

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

提升私校研發能量專案計畫 結構風工程研究之基礎建設 (2/2)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC92-2745-E-032-001-

執行期間：92 年 08 月 01 日至 93 年 07 月 31 日

執行單位：淡江大學土木工程學系

計畫主持人：鄭啟明

共同主持人：盧博堅，李世鳴，吳重成，林堉溢

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 12 月 22 日

行政院國家科學委員會

提昇私校研發能量專案計畫

結構風工程研究之基礎建設（2/2）

- 研究報告 -

主持人：鄭啟明

共同主持人：盧博堅 李世鳴

王人牧 吳重成

林堉溢

協同主持人：陳若華 陳振華

執行期限：民國九十一年八月一日 至

民國九十三年七月三十一日

執行單位：淡江大學

中 華 民 國 九 十 三 年 十 二 月 二 十 二 日

結構風工程研究之基礎建設

目 錄

第一章 前言	1-1
第二章 經費使用概述	2-1
第三章 3D 有限元素結構動力分析模式	3-1
3-1 儀器特性	3-1
3-2 高層建築外牆表面設計風壓	3-3
3-3 高樓抗風系統之設計風力	3-9
第四章 流場量測與紊流結構識別技術研究	4-1
4-1 計畫概述	4-1
4-2 計畫定位	4-2
4-3 計畫目的	4-2
4-4 研究方法	4-2
4-5 實驗設置與方法	4-4
4-6 結果與討論	4-8
4-7 結論	4-9
4-8 參考文獻	4-14
第五章 風工程計算平台之建構	5-1
5-1 計畫概述	5-1
5-2 風工程計算平台建構	5-1
5-3 風工程實際問題之應用	5-12
5-4 風工程計算平台與實驗方法的整合應用	5-19
第六章 結構風工程知識管理平台之發展	6-1

6-1 前言	6-1
6-2 研究目的	6-1
6-3 知識管理介紹	6-2
6-4 研究方法	6-3
6-5 結論展望與成果自評	6-12
6-6 參考文獻	6-13
第七章 <u>橋樑抗風減振之消能裝置校正基準平台之架構建立</u>	7-1
7-1 計畫概述	7-1
7-2 第一年完成項目	7-2
7-3 第二年完成項目	7-9
第八章 <u>長跨徑橋梁風洞試驗方法與技術的提升</u>	8-1
8-1 計畫目的	8-1
8-2 計畫內容與研究方法	8-1
8-3 全模型風洞試驗結果	8-11
8-4 結論與建議	8-12

第一章 前言

陸地上的建築與土木結構物所受的環境作用力大體上可分為地震力與風力兩大項，台灣恰好位於強震與強風區。地震可能造成生命財產的災害極為驚人，是社會大眾及工程界極為重視的防災項目。相對而言，風害造成損失以及對於社會的衝擊較為溫和，也較不受工程界與防災體系的重視。然而依據保險業者的統計，全球風災造成的經濟損失超過其他自然災害。台灣地區的建築形式容或與其他地區不同，使得風災造成的經濟損失較之地震為輕，然仍是一項不可輕忽的環境作用力。

淡江大學土木學門相關系所多年以來以風工程研究為其發展重點，近年從事之風工程研究包括：(i)鈍體氣動力(ii)建築結構風工程(iii)橋梁風工程(iv)環境風場(v)大氣擴散(vi)控制減振(vii)計算風工程等。為了使本計畫能夠有效的達成其目標，所以將現階段風工程的發展重點設定在結構風工程：高層建築、高塔、低層建築、橋梁等結構物所受的風力以及其結構反應。

結構風工程的主要研究標的物包括了高層建築與高塔、低層建築、纜索支撐橋梁等。研究的內涵為(i)探討風場與結構體之間的空氣動力特性 (ii)結構物所受的風壓與風力特性 (iii) 結構物受風作用的反應與可能的氣彈力現象 (iv)透過主、被動控制裝置，進行結構減振 (v)結構設計風力之研擬。

由於結構風工程的問題核心是極為複雜的流體-結構互制現象，傳統上的研究方法是風洞實驗物理模擬為主，數值計算為輔。近年來由於計算機的快速進步，使得計算流體力學(CFD)在風工程上的應用逐漸受到重視，在可預見的未來計算風工程(Computational Wind Engineering)與風洞實驗必同樣成為風工程研究的重要工具，屆時一個具有研發潛能的實驗室必須同時具備風洞實驗與 CWE 的基礎架構。此外，由於風工程是一項應用科學，實驗室的各項研究必須和工程實務結合。換言之，在實驗室中無論是採用物理模擬或是數值模擬，都必須以實場監測數據為研究方法的最終驗證。在國際風工程界，結構風力效應的實場監測都是一項受到重視的研究工作，也是本研究中心長期發展風工程研究所應具備的研究能力之一。

本計畫的目的在於以提昇結構風工程研究能力，以淡江大學土木、水環、航太三系從事風工程研究的教師為核心，依據結構風工程長遠發展的需求邀請兩位校外從事相關研究的學者，組成結構風工程研究團隊，期望透過所提出之整合型研究計畫，達成下列目標：

1. 結構風工程研究之相關硬體的改善，提昇團隊之長期研究能量。
2. 風洞實驗中紊流、風壓、風力量測與分析系統之改進。

3. 建立數值風工程計算能力(CWE -- Computational Wind Engineering)。
4. 建立一個風工程知識管理平台以有效整合研究團隊在風洞實驗、數值計算、模式分析等等各方面所累積的研究成果。
5. 建立良好的減振阻尼器基本性能測試能力,提昇未來發展結構減振相關研究的品質。
6. 橋梁風洞模型實驗能力之發展與改善。

本報告將敘述本計畫之執行成果,其內容將包括以下篇章:

- 第一章 前言
- 第二章 經費使用及計畫進度概述
- 第三章 3D 有限元素結構動力分析模式之發展
- 第四章 流場量測與紊流結構識別技術研究
- 第五章 風工程計算平台之建構
- 第六章 結構風工程知識管理平台之發展
- 第七章 橋樑抗風減振之消能裝置校正基準平台之架構建立
- 第八章 長跨徑橋梁風洞試驗方法與技術的提升

第二章 經費使用概述

本章內容主要是概述本計畫中所有重要硬體設備之採購狀況。本計畫儀器預算原兩年共為 11,200,000 元，採購完成之儀器設備及軟體依計畫需求分為六大類，其總價為 11,107,057 元，詳細內容及金額如下表所示：

品名	多頻道電子式風壓掃描器：	金額	5,480,000 元
說明	<p>(1)壓力訊號處理系統（二組）</p> <p>RADBSAE3200</p> <p>RAD A/D3200 A/D MODULE</p> <p>USB-EXT3200</p> <p>RDS3200 Remote digital switch</p> <p>RPM1000 Power supply</p> <p>Connect cable</p> <p>(2) 64 頻道壓力感應器模組</p> <p>ZOC33/64P 64-channel pressure scanning module（五組）</p> <p>Temperature Calibration Data for ZOC33</p> <p>(3)軟體</p> <p>DSM/RADLink window based Ethernet communication</p> <p>Labview Driver for DMS for windows</p> <p>RAD.EXE executable software for RADBASE3200</p> <p>DSM Manual Field Cal software</p> <p>(4)零配件/Accessories</p>		

品名	流場可視化系統	金額	1,057,118 元
說明	(1)水冷式氫離子雷射器 (NT 555,000) 雷射共振腔體 SP-2016 穩流可調式雷射激勵器 SP-2550 雷射遙控器 SP-2670 (2) 流場數位攝影系統 (NT 502,118) 高速攝影機 Photron FASTCAM-SUPER,MODEL 1000 110V Power supply		

品名	計算風工程所需之軟、硬體	金額	718,331 元
說明	(1) 計算流體力學軟體/STAR-CD+PROSTAR(永久買斷)+前處理軟體/ICEM CFD (租用一年) (NT 470,000) (2) 計算流體力學軟體外掛模組 (NT 55,125) (3) 計算流體力學後處理軟體/Tecplot (NT 44,000) (4) 資訊硬體 Pentium 4 2.53G 三台 (NT 149,206)		

品名	建立結構風工程知識管理平台之軟硬體	金額	290,700 元
說明	(1) Windows 2000 Server 軟體 (NT 149,206) (2) JBuilder 7(教育版) (NT 28,000) (3) Jrules 智慧型代理人套件(NT 76,000) (4) WebChart3D V4.7(Linux&JSP) (NT 56,000) (5) 資訊硬體-伺服器 Pentium 4 2.53G 兩台 (NT 120,600)		

品名	橋樑消能減振之校正基準平台	金額	1,238,500 元
說明	(1)二軸振動模擬平台(NT 425,000) (2)頻譜分析儀/Spectral Analyzer(NT 565,500) 8 頻道動態分析儀 即時訊號分析處理器 (3)資料擷取系統(NT 165,000) NI PCI-7344 NI PCI-6036E (4)加速度計(NT 83,000)		

品名	實場監測系統	金額	668,405 元
說明	(1) 實場壓力量測設備(NT 179,550) 四頻道風壓訊號處理器(VAL-CD280) 壓差轉換器(VAL-DP15) (2)四頻道數位示波器 Tektronix TD-2014 (NT 78,855) (3)32 頻道資料擷取系統(NT 300,000) Spartan-S (4)風向風速儀(NT 110,000) YOUNG MODEL 09101		

品名	壓力率定系統	金額	685,000 元
說明	(1) 固定式微壓校正控制系統 Furness FUR-FCO550 (2) 可攜式微壓校正器 DRUCK DRU-DPI610LP		

品名	多件式熱線流速儀	金額	969,003 元
說明	(1)8 頻道主機一組 54N80-8channelCTA (2)二維探針 14 支 55P61-X wire probe (3) 二維探針支撐架 8 組 55H25 probe support (4)4M 同軸傳輸線 8 組		

第三章 3D 有限元素結構動力分析模式

本計畫主要應用所採購之電子式壓力掃描器，建構一套多自由度有限元素結構模式，可依據在風洞實驗中取得之多點瞬時風壓量測資料，進行高層建築表面風壓、承載風力、結構反應等完整風力分析。必要時並可進行建築結構動態反應的時間域分析。

以下分別就（1）儀器特性、（2）高層建築外牆表面設計風壓（3）高樓抗風系統之設計風力，作較詳盡的描述。

3-1 儀器特性

本計畫所購置之儀器—多頻道電子式風壓掃描器，是本計畫中的主要硬體設備，用來同步擷取作用於結構表面各點的瞬時風壓，經過適當的處理便可得到結構系統所受之平均風力、擾動風力以及外牆所受之局部風壓。

本研究團隊過去研究高層建築的風力特性時，所使用簡單矩型斷面柱體的風壓模型所設置的風壓量測孔多在 250 個上下（28 孔/層×8~10 層），若有足夠的風壓頻道數，這套系統可以解決目前風洞實驗中表面風壓（外牆設計所需）與整體動態風力（結構系統設計所需）無法同時量測的困擾。

本計畫所採購之儀器為 SCANIVALVE 公司之產品，其元件包括：

1. 壓力訊號處理系統(RADBASE3200)

- (a) 最多可支援 8 組類比訊號轉換成數位訊號之轉換器(A/D MODULE)
- (b) 最多可支援 8 組壓力感應模組，共 512 個壓力量測點。
- (c) 其類比訊號轉換成數位訊號(A/D convert)解析度達 16bit。
- (d) 最大採樣速率可達 500Hz
- (e) 採 USB 介面傳輸。
- (f) 具備網路控制與傳輸功能。

其元件如圖 3.1 所示。

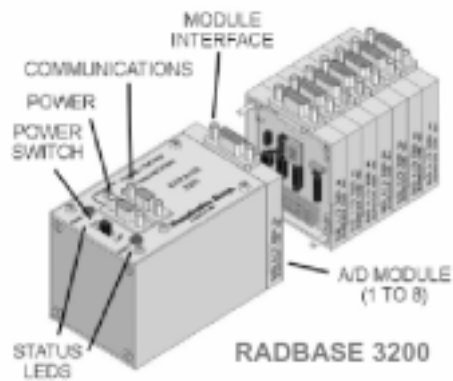


圖 3.1：壓力訊號處理系統(RADBASE3200)

2. 壓力感應器模組

特性：

- (a) 壓力感應範圍為 ± 10 in H₂O
- (b) 誤差範圍為 $\pm 0.2\%$
- (c) 壓力感應器動態反應可達 75Hz

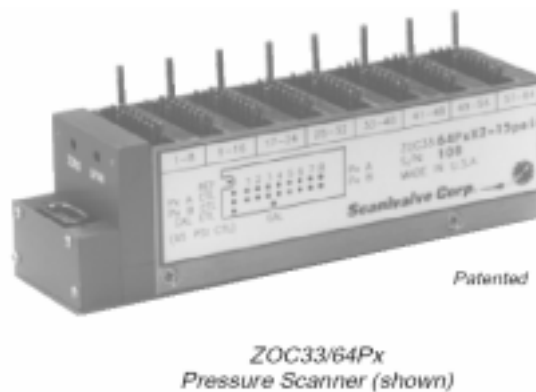


圖 3.2：64 頻道壓力感應器模組

由壓力訊號處理系統以壓力感應器模組，透過電腦主機控制則可建構一套壓力量測系統，如圖 3.3 所示。透過此系統，每秒鐘可同時擷取數百組壓力資料，若將壓力量測點，分佈於建築物表面，則可瞭解建築物局部受力狀況及整體受力狀況。

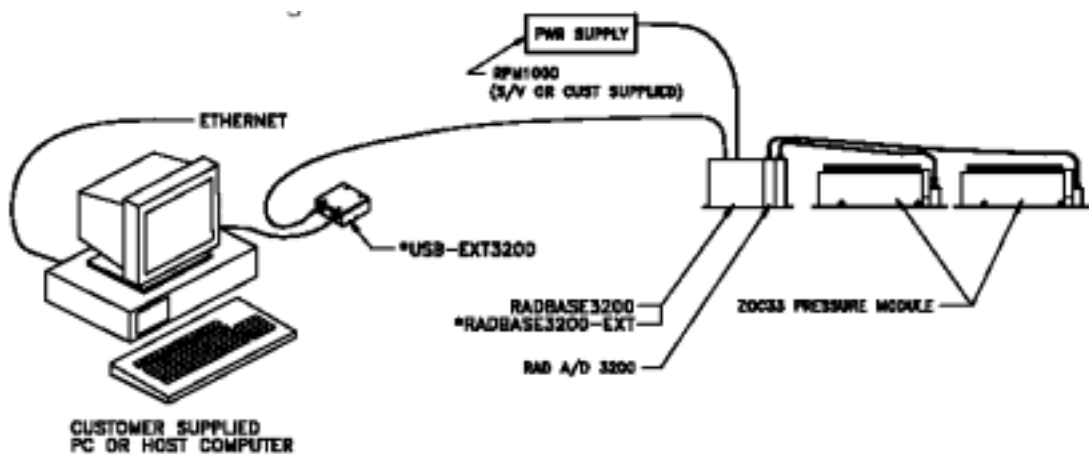


圖 3.3：壓力量測系統

3-2 高層建築外牆表面設計風壓

3-2-1 試驗概述

本計畫之試驗流程是以依實際設計之建築物為模擬標的，透過風洞實驗，計算出該建築結構系統所受之平均風力、擾動風力以及外牆所受之局部風壓。

本試驗計畫之試驗標的為一地上三十一層之鋼骨大樓，一樓樓高為 4.7m，二樓樓高為 4.0m，三樓以上為標準層樓高 3.1m，三十及三十一樓樓高為 3.5m，樓層高度為 99.4m。結構為長方形規則平面，其面積 15m×30m，結構系統採用正交抗彎構架，樓版為一鋼筋混凝土結構，梁柱樓版考慮為水平剛性隔板，以剛性樓版模擬之。主要的梁柱系統，其斷面材料性質，參考如下所示：

- (1)鋼梁部份：為鋼構材結構，鋼梁的斷面性質分為八種形式。
- (2)鋼柱部份：為鋼構材結構，鋼柱的斷面性質分為八種形式。
- (3)樓版部份：為鋼筋混凝土結構。

本建築物之立面圖如圖 3.4 所示。在試驗模型製作部分，因本模型要主要作為量測表面風壓之用，故試驗模型材料採用壓克力，先將建築物模型區分為數個元件，一般而言以一個面為一個元件，建築物模型以壓克力為材料，透過車床工具，將壓克力研磨出建築物各元件外型，再將各元件組合成建築物，最後並於壓克力上鑽風壓孔並接上風壓管。實際模型如圖 3.5 所示：

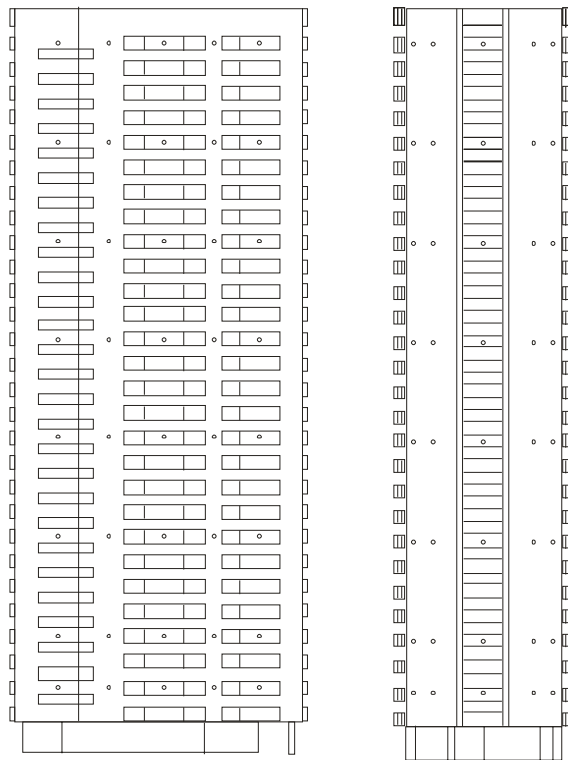


圖 3.4：模擬建築物立面圖



圖 3.5：模擬建築物模型實體圖

模型完成後，將模型安置於本中心第一號邊界層風洞中，並將風壓管連接至壓力感應器模組上，則可同步擷取所有壓力孔之瞬時壓力值。作為分析高層建築表面風壓、承載風力、結構反應等之基礎資料。

3-2-2 設計風壓

在建築物表面風壓部分，又有三種統計值需計算，分別為平均風壓，擾動風壓與極值風壓，其中平均風壓與擾動風壓，可供檢覈試驗結果是否合理，而極值風壓則作為建築物外牆設計之依據。

極值壓力之計算需採用統計學中極值分佈的理論。首先，對採樣時間內之所有取得之壓力值作判斷，取出所有獨立之風壓極值作為分配樣本，利用其極值機率分佈函數擬合出最適當之曲線。而後由設計風速中所定義之 50 年回歸週期，計算該機率值，以此機率值可在擬合曲線上對應出相對壓力值。則此壓力值為 50 年回歸週期之最大壓力。

實驗室所量測之風壓，與需經過換算才可最為實場設計風壓使用。而計算方式如下所述：

1. 將所得風壓除以邊界層高度之參考風速壓，轉換為風壓係數。
2. 取得台北市設計風速及風速壓

依據內政部建築研究所之「建築物風力設計規範條文、解說及示範例之修訂」台北市設計風速為42.5m/s，而設計風速代表C地況，高度10m處之最大十分鐘平均風速。而本實驗所用之參考風速為邊界層高度風速，而採樣時間為實場1小時。故需進行換算：

- a. 參考ASCE 7-02 之Durst Curve，十分鐘平均風速為一小時平均風速之1.06倍，先將設計風速換算成一小時平均風速。

$$U_{10m,1hour}=42.5/1.06=40.1\text{m/s}$$

- b. 將C地況十公尺高度風速換算成邊界層高度風速，地況C之值為0.15，而邊界層高度為300公尺。透過指數律換算可得邊界層高度風速。

指數律公式：

$$\frac{U_z}{U_{10}} = \left(\frac{Z}{10}\right)^\alpha \quad (3-1)$$

$$U_{300m,1hour}=40.1*(300/10)^{0.15}=66.8\text{ m/s}$$

3. 將風速換算成參考風速壓

$$0.5 \quad U_2=0.5 \times 1.226 \times 66.82=2735\text{Pa}$$

4. 將實驗所得風壓係數乘上參考風速壓即為實際之極值風壓。

當計算出所有壓力點之風壓後可利用內差方式在建築物表面繪出等壓線圖，則可瞭解整棟建築物平均風壓與極值風壓之分佈狀況。

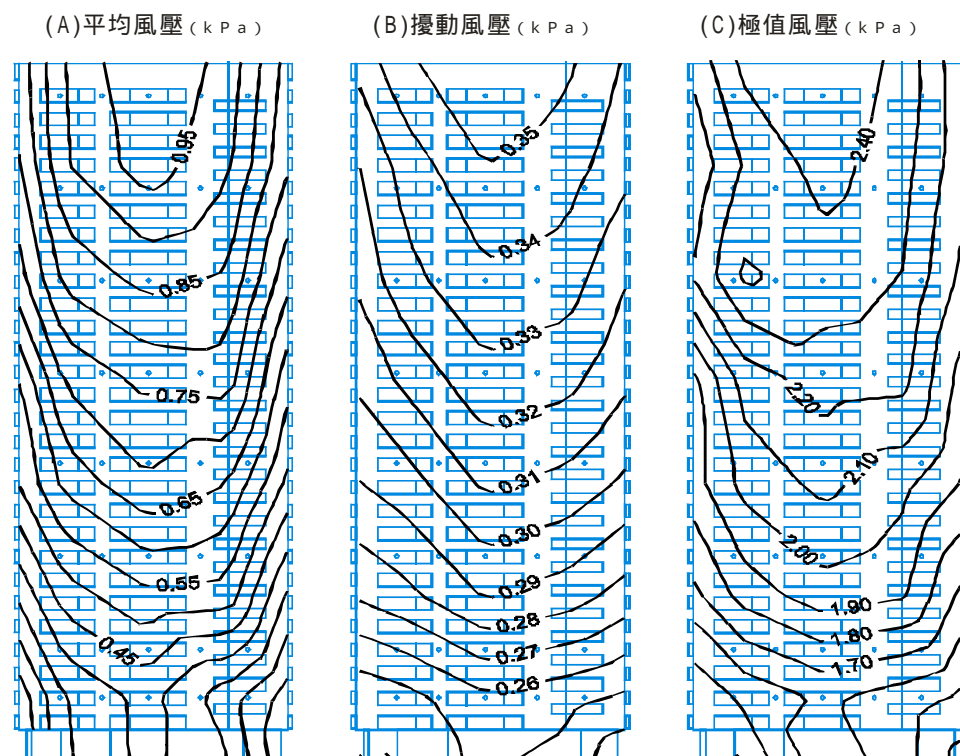


圖 3.6：迎風面壓力分佈圖

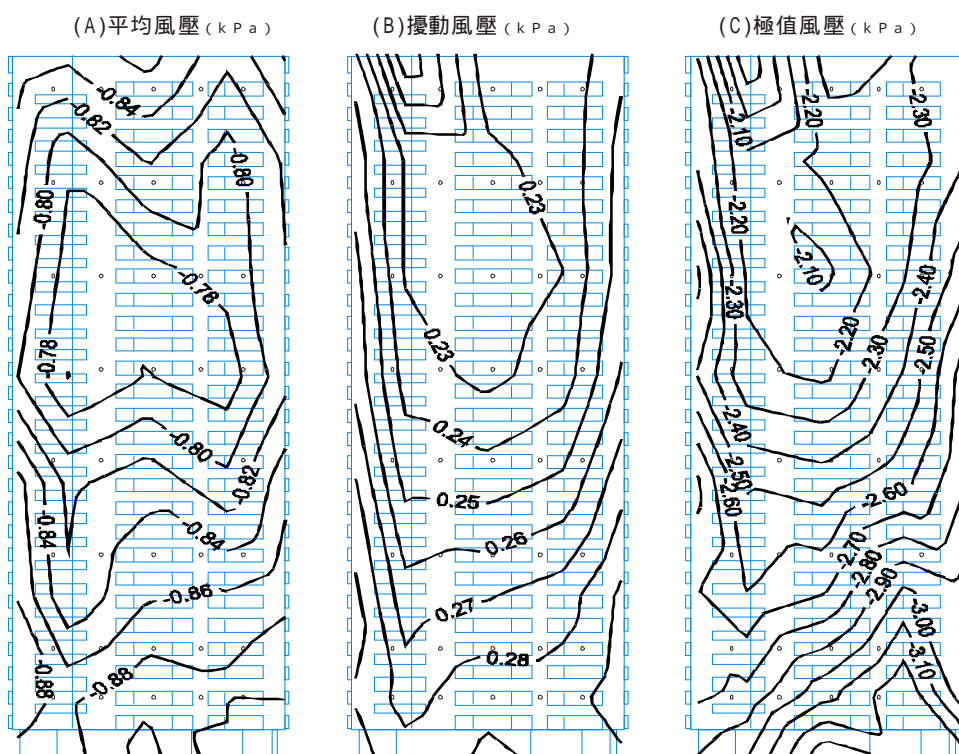


圖 3.7：背風面壓力分佈圖

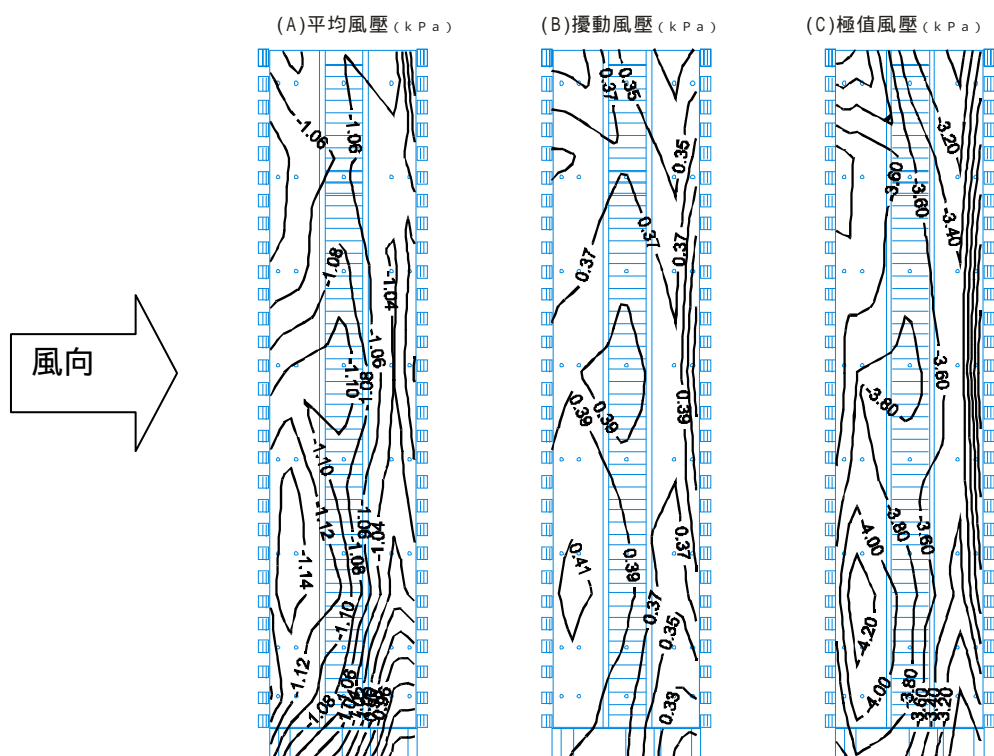


圖 3.8：側風面（左側）壓力分佈圖

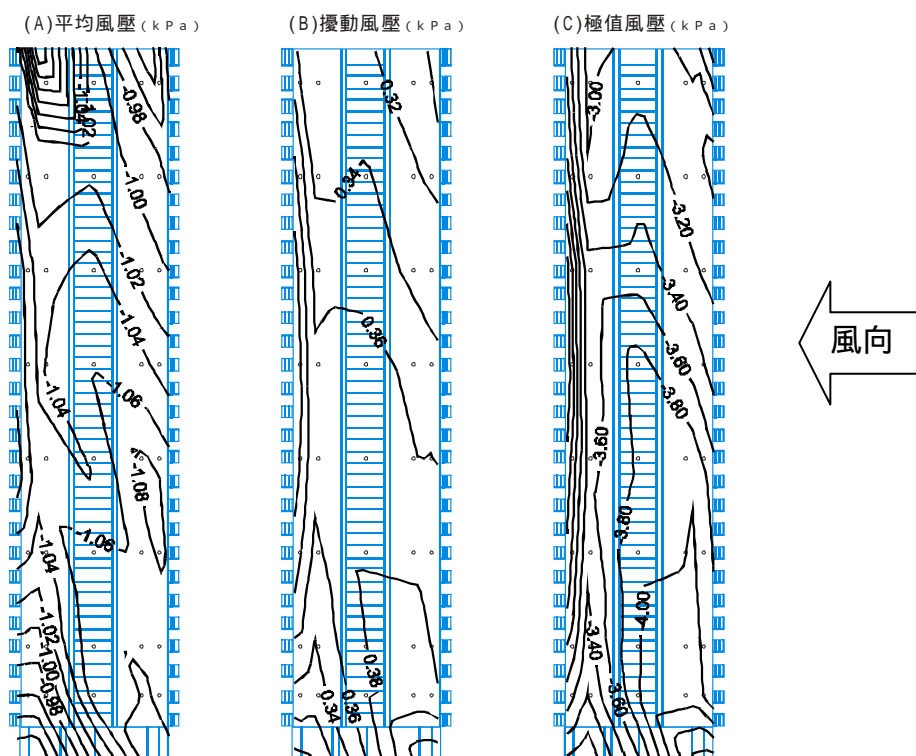


圖 3.8：側風面（右側）壓力分佈圖

由以上之壓力分佈狀況可看出，在迎風面風壓部分，隨高度越高，風壓越大，且迎風面中央較邊緣大。平均風壓、擾動風壓與極值風壓皆有相同狀況。背風面風壓部分，對平均風壓而言，建築物下半部及靠近頂端處負壓較大，且靠左右兩邊緣處之負壓較中央大。擾動風壓與極值風壓則以建築物下半部及左右兩邊緣處負壓較大。左右側風面部分，對平均風壓而言，在靠近迎風面邊緣處負壓較大，往下游而遞減，且平均負壓最大處約為 1/3 高度處，擾動風壓與極值風壓則以建築物下半部負風壓較上半部高。

3-2-3 即時風壓顯示系統

除此之外，本中心另發展一套程式可顯示建築物之瞬時風壓分佈及變化狀態。此程式是利用壓力量測系統取得分佈於建築物表面風壓孔的瞬時風壓值，將此有限點數的壓力值透過內差方式，計算出至整棟建築物表面之瞬時壓力分佈，並將瞬時壓力分佈透過繪圖程式庫，將壓力分佈狀況以彩色圖片顯示於螢幕上，每一瞬時計算並顯示一次，在時間間隔很小時則有動畫效果，由此動畫中可瞭解風所造成建築物表面壓力分佈隨時間變化情形。

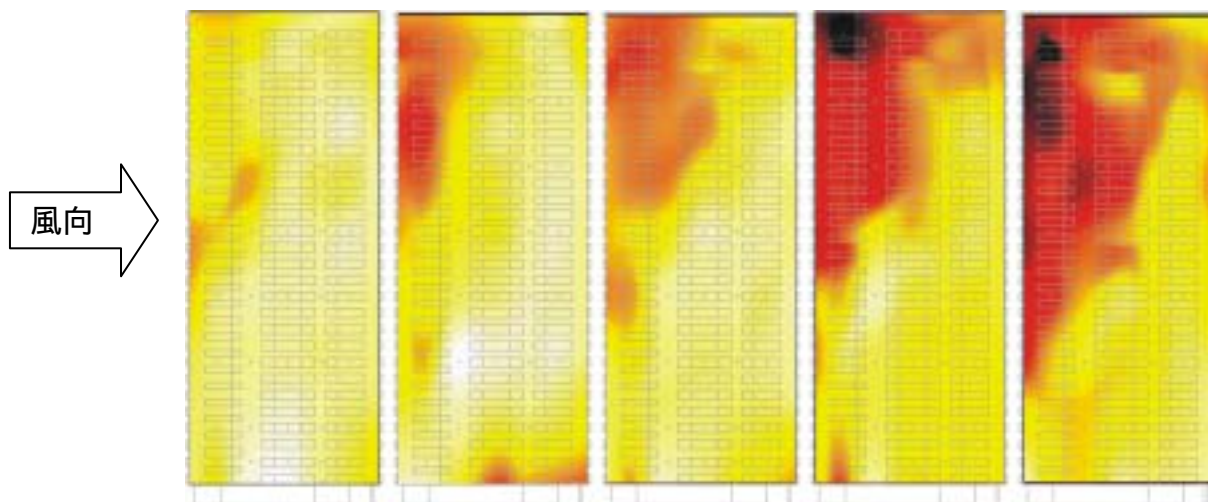


圖 3.9：風壓分佈歷時圖

3-3 高樓抗風系統之設計風力

藉由風洞物理模擬實驗計算高樓抗風系統之設計風力，包括高頻力平衡儀實驗與表面風壓實驗。二者推估建築物設計風力之方式相近，不同處為評估風力在大樓高度上之分佈情形，前者以基底剪力、基底彎矩為基礎，透過各種假設進行估算。後者則根據風洞實驗直接量測之各樓層風壓數據取代前者之部分假設，可得到更為精確之風力分佈情形。

即使表面風壓實驗有著較為準確之優點，然而風壓模型之製作與裝設，與高頻力平衡儀實驗相較而言，實屬曠日費時、所費不貲。因此本文將針對相同之標地建築物，以上述二種方式進行設計風力之評估，以了解二者間之差異。

為避免不同實驗間之誤差對設計風力之大小造成影響，本文以表面風壓實驗之數據換算為高頻力平衡儀實驗計算所需之基底剪力、基底彎矩，再分別進行設計風力之分析比較。

3-3-1 高頻力平衡儀實驗

1. 高頻力平衡儀量測原理

1980 年代初期，Tschanz & Davenport 等人發展出高頻力平衡儀(high frequency force balance)，此後很快的形成各風洞實驗室量測結構物所受整體風力的標準程序。高頻力平衡儀實驗的方法是將剛性的建築縮尺模型安置在一個高自然頻率之五分量力平衡儀上，量測建築模型基底彎矩及剪力。如下圖 3.10 中之模型在高度 z 處所受之擾動風力為 $F(z,t)$ ，則該方向之基底彎矩可寫為：

$$\tilde{M}(t) = \int_0^H F(z,t)zdz \quad (3-2)$$

由上式可知，倘若高層建築的基本振態為線性， $\phi(z) = z/H$ ，則剛性模型的基底彎矩與廣義座標之風力成一常數比例。將實驗量測所得之 $M(t)$ 做成頻譜密度函數並予以簡易的修正之後，即為廣義座標風力頻譜，再據以計算結構反應及設計風載重。對於柔性的高層建築，其基本振態不可視為為線性時，則可作一簡易的振態修正。由於風洞實驗實際量得的是風力作用在「模型-力平衡儀」系統的反應，因此要得到正確的擾動性風力，必須要設法避免「模型-力平衡儀」系統自身動力特性的影響。一般採用的方法是儘量提高「模型-力平衡儀」系統的自然頻率，使其脫離風力的有效頻率範圍。如是，透過適當的濾波便可得到正確的風力。

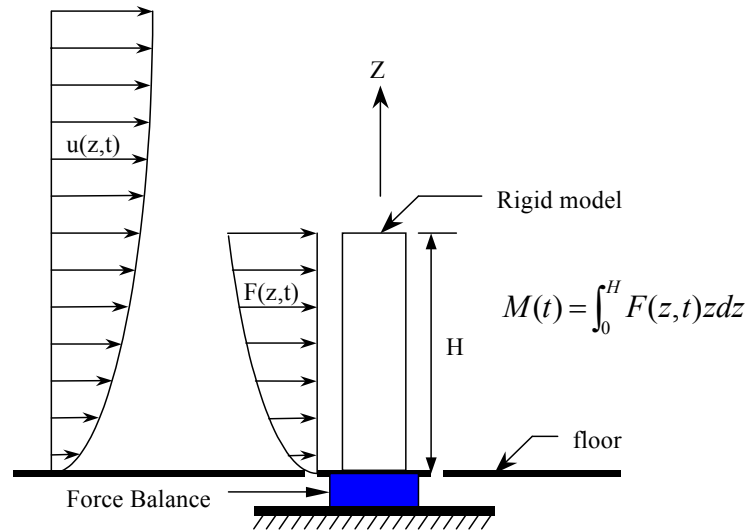


圖3.10：力平衡儀實驗量測示意圖

2. 特定風攻角條件下的高層建築設計風力

建築物所受的風力因風攻角而異，一般從事設計風力的風洞實驗時，會以 10 度風攻角為增量，共執行 36 組不同風攻角的風力與風壓量測。建築物的設計風力與設計風壓需由 36 組實驗中找出適當的風力組合。本節內容說明在 36 組實驗數據中，任意一個風攻角條件下建築物的設計風載重的計算原理。建築物在特定風攻角條件下的設計風載重為該風向的極值設計風力，是風載重平均值與擾動值的組合。各樓層風載重的極值為：

$$F_{\max,i} = \bar{F}_i + g\sigma_{F_{\text{int},i}} \quad (3-3)$$

$$g = \sqrt{2\ln(vT)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2\ln(vT)}} \quad (3-4)$$

其中 $F_{\max,i}$ 為第 i 層之極值設計風載重。 \bar{F}_i 為第 i 層之平均風載重。 g 為尖峰因子(peak factor)。 $\sigma_{F_{\text{int},i}} = \sqrt{B_i^2 + R_i^2}$ 為第 i 層之動態風載重均方根值，可分為背景反應， B_i ，與共振反應， R_i ，兩部分。

a. 平均風力

由力平衡儀量測所得之基底剪力平均值根據下述的原理計算求得設計風力平均值：

假設風速剖面為指數律，且風力係數在建築物高度上的變化可予忽略，則各樓層的平均風力有下列關係，

$$\bar{F}_i = \bar{P}_h A_i \left(\frac{Z_i}{H} \right)^{2\alpha} \quad (3-5)$$

其中 \bar{F}_i 為建築物 i 樓層之平均風載重， \bar{P}_h 建築物高度時之平均設計風壓。力平衡儀所得之平均基底剪力， \bar{F} ，為 1 ~ n 樓層平均風載重之和：

$$\bar{F} = \bar{P}_h \left[A_1 \left(\frac{Z_1}{H} \right)^{2\alpha} + A_2 \left(\frac{Z_2}{H} \right)^{2\alpha} + \dots + A_n \left(\frac{Z_n}{H} \right)^{2\alpha} \right] \quad (3-6)$$

b. 擾動風力

高層建築之動態設計風載重是以高頻力平衡儀量測取得廣義風力頻譜 $S_F(f)$ 之後，經由下列之結構動力分析求得。高層建築抗風設計一般可忽略高次振態，令 $\phi(z)$ 為高層建築之基本振態，結構基本振態廣義座標運動方程式如下：

$$M^* \ddot{Y}(t) + C^* \dot{Y}(t) + K^* Y(t) = F^*(t) \quad (3-7)$$

式中， M^*, C^*, K^* 分別為廣義座標質量、阻尼與勁度， $F^*(t)$ 廣義座標風力，

$$\begin{aligned} M^* &= \int_0^H m(z) \phi^2(z) dz \\ K^* &= \int_0^H EI(z) (\phi''(z))^2 dz = (2\pi f_0)^2 M^* \\ C^* &= 2M^* (2\pi f_0) \xi \\ F^*(t) &= \int_0^H F(z, t) \phi(z) dz = \frac{1}{H} \int_0^H F(z, t) z dz = \frac{\tilde{M}(t)}{H} \end{aligned} \quad (3-8)$$

式中， $\tilde{M}(t)$ 為力平衡儀所量得之模型基底彎矩。經修正振態函數之後，以 Fourier Transform 轉換至頻率域，可得廣義風力頻譜(generalized wind force spectra) $S_{F^*}(f)$ 。高層建築之廣義座標設計風載重，即其彈性力， $F_{int}^* = K^* Y$ ，之均方根值為：

$$\begin{aligned} \sigma_{F_{int}^*} &= K^* \sigma_Y = \left(\int_0^\infty S_{F^*}(f) |H(f)|^2 df \right)^{1/2} \\ |H(f)|^2 &= \frac{1}{\left(1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right)^2 + \left(2\xi \frac{f}{f_0} \right)^2} \end{aligned} \quad (3-9)$$

由於在風力計算中，將動態風載重分為背景反應與共振反應，且二者在高度上的分佈方式不盡相同，因此上式也分別計算。其中共振部分可由下式求得：

$$\sigma_R^2 = \frac{\pi f_0}{4\xi} S_{F^*}(f_0) \quad (3-10)$$

各樓層的共振部分擾動風載重計算，則是基於共振時結構振動近似簡諧函數，此時高層建築彈性力的分佈近似於其慣性力分佈的假設之上：

$$\text{第}i\text{層之慣性力 / 廣義慣性力} = \frac{m_i \phi(z_i) \ddot{Y}}{M^* \ddot{Y}} = \frac{m_i \phi(z_i)}{M^*} \quad (3-11)$$

換言之，第 i 層樓的共振反應， R_i ，可由下式求得：

$$R_i = \sigma_R \frac{m_i \phi(z_i)}{M^*} \quad (3-12)$$

動態風載重的背景反應部分，由於結構動力效應並不顯著，其分佈應與速度壓相近。因此，動態風載重的背景反應採用高頻力平衡儀實驗量測中的基底剪力為計算依據。

$$F(t) = \int_0^H F(z, t) dz \quad (3-13)$$

$F(t)$ 之均方根值即為高層建築動態風載重背景部分之總和， σ_B 。第 i 層樓的背景反應， B_i ，可由下式求得：

$$B_i = \sigma_B \frac{\overline{F_i}}{\overline{F}} \quad (3-14)$$

動態風載重 = $(R_i^2 + B_i^2)^{0.5}$ 。

c. 動態設計風力計算過程中的結構振態修正

由前文可知，當高層建築的水平向振態為線性時， $\phi(z) = z/H$ ，廣義外力為：

$$F^*(t) = \int_0^H F(z, t) \phi(z) dz = \frac{1}{H} \int_0^H F(z, t) z dz = \frac{\tilde{M}(t)}{H} \quad (3-15)$$

式中， $\tilde{M}(t)$ 為力平衡儀所量得之模型基底彎矩。此時風洞力平衡儀實驗量測所得的模型基底彎矩與廣義座標之風力成一常數比例，可以直接用於結構動力分析。一般來說，高層建築在水平方向的振態與理想的線性振態相距不大，振態上的差異對於動態設計風力的影響不大。令 λ_1 為水平向的廣義座標風力與力平衡儀量測值之比：

$$\lambda_1 = \frac{\int_0^H F(z, t) \phi_{x,y}(z) dz}{\int_0^H F(z, t) \frac{z}{H} dz} \quad (3-16)$$

其中 $\phi_{x,y}(z)$ 為水平向振態，可表示為 z/H 的指數型態：

$$\phi(z) = \left(\frac{z}{H} \right)^\beta \quad (3-17)$$

在高度 z 上的瞬間風力 $F(t, z)$ 可寫為下列的表示式：

$$F(t, z) \approx C_t(t, z)U^2(z) \quad (3-18)$$

其中 $C_t(t, z)$ 代表風力與風速平方之間關係的係數。

平均風速剖面以指數律表示之：

$$\frac{U(z)}{U(H)} = \left(\frac{z}{H} \right)^\alpha \quad (3-19)$$

z 高度風速可寫為 $U(z) = (z/H)^\alpha U(H)$ ，代入前式則可得 z 高度的風力：

$$\Rightarrow F(t, z) \approx C_t(t, z)(z/H)^{2\alpha}U^2(H) \quad (3-20)$$

F^* 為廣義座標下風力：

$$\begin{aligned} F^*(t) &= \int_0^H F(t, z)\phi(z)dz \\ &\approx \int_0^H C_t(t, z)(z/H)^{2\alpha}U^2(H)\phi(z/H)dz \end{aligned} \quad (3-21)$$

廣義座標風力自相關函數為：

$$R_{F^*}(\tau) = \iint E[C(t, z_1)C(t + \tau, z_2)] \left(\frac{z_1}{H} \right)^{2\alpha} \left(\frac{z_2}{H} \right)^{2\alpha} U^4(H)\phi(z_1)\phi(z_2)dz_1dz_2 \quad (3-22)$$

廣義座標風力頻譜為：

$$S_{F^*}(f) = \iint R_e(\Delta z, f) \left(\frac{z_1}{H} \right)^{2\alpha} \left(\frac{z_2}{H} \right)^{2\alpha} \phi(z_1)\phi(z_2)U^4(H)dz_1dz_2 \quad (3-23)$$

$R_e(\Delta z, f)$ 為交頻譜，代表頻率域中風力的空間相關性，假設其為一定值。

結構振態函數分別代入原型結構之振態， $\phi(z) = \left(\frac{z}{H} \right)^\beta$ ，以及力平衡儀實驗中之

內含振態：水平方向為線性振態，並以此振態下的頻譜比為修正係數，可得：

$$\begin{aligned} \text{correction factor} &= \frac{\phi = (z/H)^\beta \text{之頻譜}}{\phi = (z/H) \text{之頻譜}} \\ &= \frac{\iint \left(\frac{z_1}{H}\right)^{2\alpha+\beta} \left(\frac{z_2}{H}\right)^{2\alpha+\beta} dz_1 dz_2}{\iint \left(\frac{z_1}{H}\right)^{2\alpha+1} \left(\frac{z_2}{H}\right)^{2\alpha+1} dz_1 dz_2} \\ &= \left(\frac{2\alpha+2}{2\alpha+\beta+1}\right)^2 \end{aligned} \quad (3-24)$$

將上式的結果開根號可得在時間域上的修正係數。

3-3-2 表面風壓試驗

計算設計風載重之另一種實驗即為 3-2 節所描述之表面風壓試驗。將風壓實驗結果轉換為設計風載重之計算原理與高頻力平衡儀十分接近。不同處在於將平均風力與擾動風力（背景部分）於各樓層之載重分配方式，替換為風壓實驗在各樓層實際量測之實驗數據：

$$\bar{F}_i = \text{風壓實驗於各樓層之平均風力}$$

$$B_i = \text{風壓實驗於各樓層之擾動風力}$$

由於分佈方式是風洞實驗之結果，故其遠較以風速剖面之分配更接近實際情況。

至於擾動風載重之共振部分，分配方式以結構本身之動力行為模式為主，故仍使用基底彎矩與廣義座標風力間之關係為基礎。力平衡儀實驗與風壓實驗在共振方面之風載重計算方式是一致的。

3-3-3 實驗結果與討論

本章節目的在於討論高頻力平衡儀實驗法與表面風壓實驗法，此二者在計算高樓結構設計風載重時之差異性。為避免不同實驗間之量測誤差影響比較之準確性，文中所使用之風洞物理模擬實驗數據，統一以風壓實驗之結果為基礎。研究過程並不進行力平衡儀實驗，而以風壓實驗結果另外推導前者計算風載重所需之基底剪力與彎矩。

計算結果如下圖 3.11 - 3.14 所示，設計風載重之表示方式，考慮該實驗模型各樓層高度並不一致，若以樓層整體受力（kN）處理，所顯示之結果將包含樓層受風面積之差異，干擾真正影響風載重因素之判斷。故此處以壓力（kPa）之形式繪製以避免上述困擾。

實驗數據皆來自 3-2 節同一模型之風壓實驗。依據不同之結構動力特性，區分為 model A 與 model B。設定此二者之 mode shape、mass、damping ratio 皆相同，僅有勁度改變使其結構基本振態之頻率分別為：model A， $f_x=0.67$ ， $f_y=0.49$ ；model B $f_x=0.20$ ， $f_y=0.14$ 。區別此二分析模型之用意在於判斷共振部分之擾動風載重受結構自然頻率影響之程度。

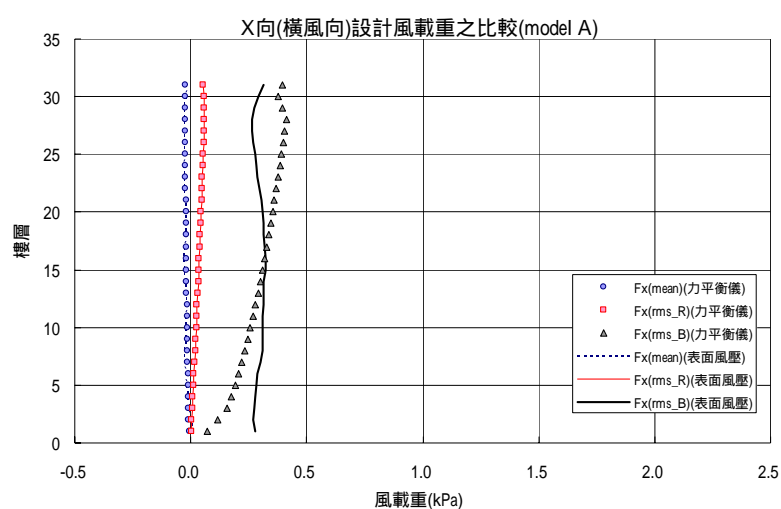


圖 3.11：model A 於 X 向(橫風向)設計風載重之比較

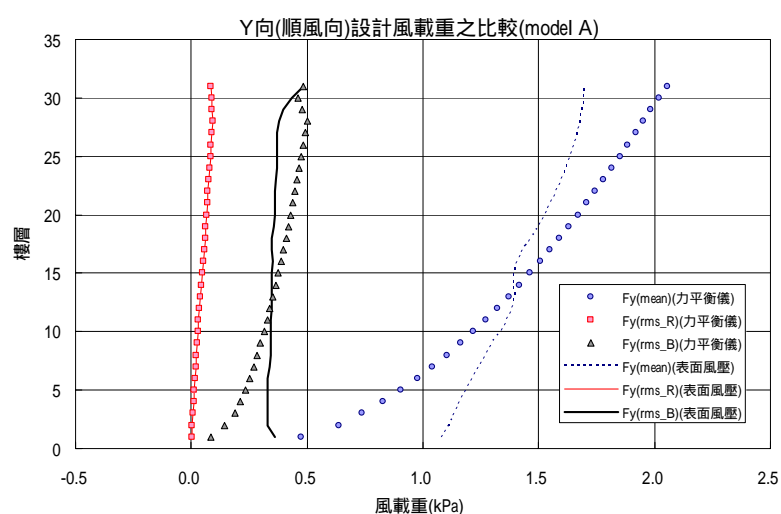


圖 3.12：model A 於 Y 向(順風向)設計風載重之比較

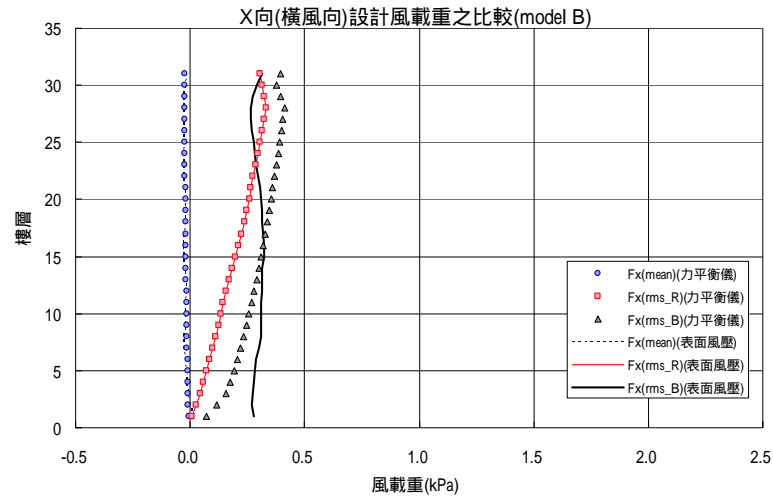


圖 3.13：model B 於 X 向(橫風向)設計風載重之比較

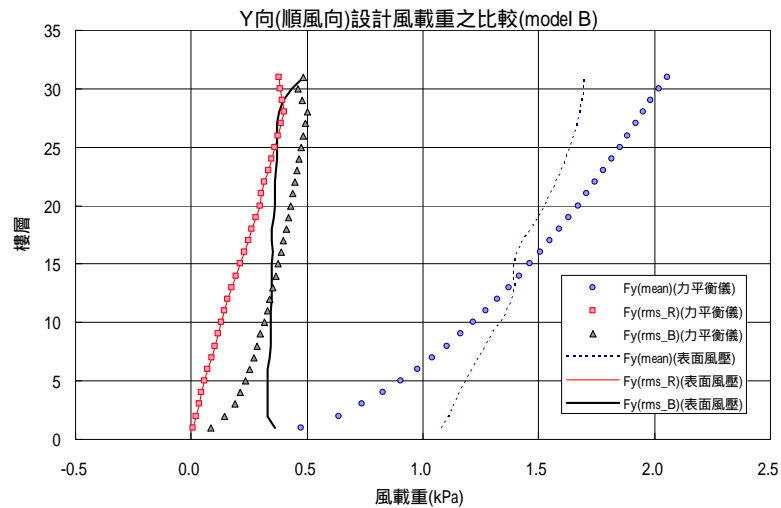


圖 3.14：model B 於 Y 向(順風向)設計風載重之比較

1. 平均風載重

此部份與結構動力特性無關，因此 model A、B 之結果相同。對於 X 向(橫風向)而言，大樓對稱之外形使其平均風力接近零。對 Y 向(順風向)而言，力平衡儀法是以風速剖面做為平均風載重分配之依據，其形狀即近似於風速剖面。表面風壓法是直接以風壓實驗所量得之各樓層風力為依據，其形狀便近似於 3-2 節之風力係數分佈。此二者之差異，於高樓層處力平衡儀法偏大，低樓層處偏小。原因應該是建築物背風壓之分佈方式與風速剖面不同，大致上保持一定值，如 3-2 節所述。因為樓層整體風力是迎風面風壓與背風面風壓共同作用之結果，在迎風面風壓接近風速剖面分佈但背風面風壓接近定值之狀況下，即造成上述之現象。

2. 擾動風載重

與平均風載重相同，擾動風載重之背景部分與結構動力特性無關，因此 model A、B 之結果相同，分配方式亦與平均風載重一致。對於 X、Y 兩方向之風載重分配而言，於高樓層處力平衡儀法偏大，低樓層處偏小。與平均風載重類似，也是橫風向風壓分佈不近似於風速剖面之結果。

擾動風載重之共振部分則與結構動力特性相關，而與模型的實際風壓分佈方式無關。因此同一個 model 力平衡儀法與表面風壓法之擾動風載重共振部分是相同的。在本分析中，model A 之結構模式是模擬真實世界之實際建築物，在這樣之自然頻率下，共振部分之擾動風載重遠低於背景部分。亦即擾動風載重由背景部分控制，甚至可忽略共振之效應。model B 則複製 model A 之結構特性，僅降低其自然頻率之大小，亦即結構勁度變小。計算結果可發現，model B 有顯著之共振擾動值，遠大於 model A 之結果。也因此擾動風載重之大小由背景部分與共振部分共同決定。

第四章 流場量測與紊流結構識別技術研究

4-1 計畫概述

流場量測與紊流結構的識別為探討鈍體氣動力行為起源及流場作用方式的重要技術，在結構物之風洞實驗中，利用壓力量測的技術可以精確的掌握到結構物受流場作用下，所受到的各項風力特性，進而提供結構分析與設計上有關受風力作用評估的重要依據。

結構體所受之氣動力作用來自流場中某項紊流結構的特性，而結構體自身亦對流場產生一定程度的影響，進而產生如側邊分離剪力流、尾流等流場行為，要了解流場與結構體兩者間的作用特性，必須對流場之紊流結構有深入的探討，此方面的研究及量測技術亦成為風洞實驗室中關於流場研究與驗證的重要技術指標。

有關流場特性的量測可由定性及定量兩大部分加以探討。定性的流場量測探討結構體周邊流場生成與演變的趨勢，尋求其表現出來的特徵。定量流場量測則著重在數量化的流場量測結果，對於紊流場中不同特徵結構的生成及分布有進一步的了解。

風洞中流場可視化技術如發煙熱絲(smoke wire)或 PIV(particle image velocimetry)等，經多位學者(4-1,4-2,4-3)研發，已成為觀測流場的重要工具。由於雷射技術的進步，使用雷射切光產生光屏，以觀察柱體模型週遭煙流流動變化情形(4-3)，成為定性分析上成熟的重要工具。而柱體尾流區之量測，除 PIV 等方法外，已有多位學者(4-4,4-5,4-6)指出採用 X 型熱膜探針陣列(probe rack)進行量測可分析獲得流場渦度、紊流主要結構等量化的成果，有助於對尾流中紊流結構的了解。

淡江大學風洞實驗室累積多年的研究經驗，對於鈍體結構之氣動力特性量測已累積相當多的技術，且漸趨成熟。經由對結構表面壓力的量測，已初步掌握鈍體之受風力特性，包括平均風力、擾動性風力、尖峰風力、風力頻譜及位移反應預測等技術項目。而結構體周邊流場的量測亦透過多支探針組的移動量測，配合凍結流場之計算方式，掌握對於鈍體尾流的渦度分布狀況量測技術，進而探討不同深寬比二維矩柱體尾流區的渦度分布特性及尾流生成過程。

目前本實驗室在流場探測的研究技術上遭遇到的技術瓶頸包括，流場可視化與尾流量測兩方面。在流場可視化的技術方面，本實驗室曾經使用功率 200mW 之二氧化碳雷射光源，配合柱狀鏡片，產生雷射切光光屏，在使用發煙器於二維柱體上游製造煙流，據以觀測二維柱體周邊流場的變化。但受限於雷射光源的功率過小，觀測所得甚為有限，且缺乏良好的紀錄設備將之作成紀錄。在尾流量測方面，受限於現有之風速儀(TSI IFA-100)頻道數仍不足，因此更細緻的量測無法進行。本計畫將針對此兩項問題加以解決，以提昇實驗室及研究團隊之技術能力。

4-2 計畫定位

為使本實驗室之研究團隊具備更現代化及精確的實驗技術與數值解析能力，未來能更進一步具備解析結構物周邊流場之能力，擬訂本計畫將量測技術與設備更進一步提昇，建立更可靠的流場可視化技術能量，同時利用強化探針組(probe rack)的量測技術與數據分析方式，建立識別紊流結構的能量。

4-3 計畫目的

本年度計畫的目的在於提昇實驗室之流場可視化與尾流區流場特性探測、分析的技術能量。建立鈍體尾流區紊流結構識別技術，本計畫將利用更完整之熱探針組，量測鈍體結構之尾流流場資料，並建立由量測資料中識別紊流結構之技術。

4-4 研究方法

本研究團隊在流場量測技術上已具備利用 LDV 探測人工心瓣運動間周邊流場變化之技術(4-6,4-7)，及利用探針組量測與分析二維方柱尾流區渦度分布之技術(4-8)，本年度之研究主題為「鈍體尾流區紊流結構識別技術能量之建立」，研究工作方法詳述如下：

(一)鈍體尾流區紊流量測

本計畫利用現有 IFA-100 風速儀之頻道數，並採購新式風速儀，使總體可用的探針量測頻道數擴充至 12 個可用頻道的規模，設計製造一可移動位置之三維載台，在其上架設 6 支 X-型熱膜探針，依探針絲面的佈設方式，可同時量測流場中水平面(u-v plane)或垂直面(u-w plane)上的紊流結構，實驗設置如圖 4.1 所示。量測所得即為同步之線狀分布流場資料，因此可計算其相關性，將此相關性資料利用正交化分析，識別流場中之紊流結構。



柱體尾流區中紊流結構的探討，包括渦度計算、相關性結構(coherent structure)分析等重要項目。渦度量測與計算方式如文獻(4-6)本實驗所採用之方法已獲致良好的成果，而紊流結構識別方面，本研究採用各探針時序列資料之相關性利用 POD 法(4-9~4-14)加以分析並據以判斷。

$$R_{ij} = \overline{u_i(x, t)u_i(x', \tau)} \quad (4-1)$$

4-3

$$\int R_{ij}(x, x', t, \tau) \Phi_j(x', \tau) dx' d\tau = \lambda \Phi_i(x, t) \quad (4-2)$$

其中 λ 為相對應的特徵值。因特徵模態為正交的，所以

$$R_{ij}(x, x', t, \tau) = \sum_n \lambda_n \left| \Phi_i^n(x, t) \right|^2 \quad (4-3)$$

$\phi_i^n(x, t)$ 表第 n 個模態，流場資料可用正交模態的組合加以重現

$$u_i(x, t) = \sum a_n \phi_i^n(x, t) \quad (4-4)$$

$$a_n = \frac{\iint u_i(x, t) \phi_i^n(x, t) dx dt}{\iint [\phi_i^n(x, t)]^2 dx dt} \quad (4-5)$$

Tamura(4-15)指出，由 R_{ij} 求出的特徵值與特徵向量代表擾動系統中最主要存在的相關結構，採用正交特徵向量所表現的座標系統，代表流場中主要的能量所投影的空間方向，而流場中主要的能量大多數集中於較低模態(mode)之特徵向量。Kopp(4-5)直接利用 R_{ij} 求得特徵向量，並以低階模態討論尾流流場中的主要成分。低模態之特徵向量代表流場結構中較主要的結構，因此利用該模態與流場可視化圖形相比(pattern recognition)，將有助於辨識紊流場中主要的特徵結構(4-4)。由第一年之研究成果，可獲得柱體尾流區流場之變化資訊，第二年再以相同模型配置，而以探針陣列進行量測流場，並利用 POD 法求得 R_{ij} 的特徵向量 $\phi_i^n(x, t)$ ，利用低階模態代表紊流主要結構，探討柱體尾流區流場分布情形。

4-5 實驗設置與方法

(一) 採購儀器與設備：

本計畫主要採購的實驗設備包括多頻道恆溫式風速儀及 X 型熱絲探針組等，分述如下：

1. 多頻道恆溫式風速儀：

本研究依規劃利用六支二維探針進行方柱尾跡量測，共需要 12 個風速儀頻道，因此採購由 DANTEC 公司所生產製造風速儀 54N80，此儀器一次可分析 8 個頻道熱膜探針，並可兩部串接使頻道數最多可至 16 頻道。54N80 的操作介面相當簡單，除部份設定以 DIP 開關方式調整，使用時直接開啟即可備便使用。

量測之探針支座(support)可搭配 DANTEC 所生產 4 米或是 10 米的探針纜線，與 54N80 相連。風速儀 54N80 之重要諸元如表 4.1 所示。

表 4.1：DANTEC 54N80 風速儀之重要規格與性能

項目	規格與功能	備註
品牌	DANTEC (Multichannel CTA 54N80)	
使用探針型態	Hot wire	
頻道數	8 channels, 可兩部串接成 16 channels 系統	
Frequency response	10 kHz	
探針纜線長度	10 m	
低通濾波	1, 3, 10 kHz	DIP switch
輸出接頭	8 BNC 接頭	
體積	28 x 30 x 6 cm	
重量	1.25 kg	
最大輸出電壓	5 V	

另外四個頻道則由 IFA 100 智慧型風速儀來進行量測，其操作過程較為複雜但系統彈性較大。上述 12 頻道輸出電壓都透過 A/D 轉換系統傳入個人電腦加以記錄及進行程式分析。

2.探針陣列

本計畫採購 X 型熱絲探針共計六支，並設計製作可三軸向調整位置之探針架，將探針架設於模型下游側，如圖 4.2、4.3 所示，依實驗規劃垂直及前後兩方向移動，量測流場資料。其探針排列從上至下：前四支探針主要以 54N80；第五、六支則由 IFA 100 智慧型風速儀來進行量測工作。

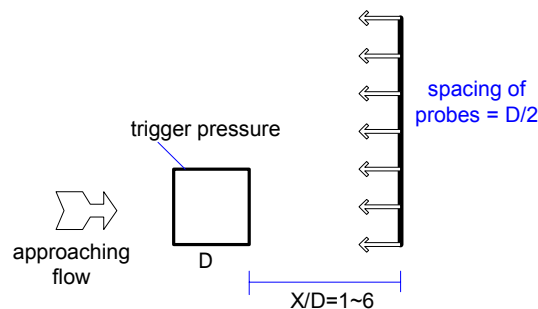


圖 4.2：探針陣列架設與模型配置



圖 4.3：架設於採樣架上之探針陣列(探針前方為二維方柱模型)

(二)實驗設計

1.風洞實驗室

本實驗利用淡江大學大氣邊界層風洞(Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel)來進行二維方柱尾流特性研究；此風洞為一開放吸入式風洞（open suction type），試驗段為長 7.4m×寬 1.5m×高 1.8m 之矩形空間且入口斷面為 3m×2.7m，收縮比約為 1:4。風扇動力系統採用 125 匹馬力之 220V 直流馬達，採離心式渦輪供氣，其有效風速範圍為 2m/s~30m/s，平滑流場之紊流強度約為 0.6 %。

2.探針率定

探針使用之前都需要加以校正，其校正方式以多個不同的已知單一流向風速 U 校正探針，量測所得之風速及電壓值兩者間的關係以金氏定理(King's Law)加以描述：

$$E^2 = A + B \cdot U^\alpha \quad (4-6)$$

其中 E 代表電橋之補償電壓值，而係數 A 、 B 、 α 以非線性回歸方法求得。

3.氣動力模型

本實驗使用以壓克力板粘合的正方斷面柱體作為氣動力模型，模型邊寬為 4 公分、長為 150 公分，其長寬比為 37.5，模型固定於風洞的兩側壁間；模型在順風向的投影面積與風洞斷面比（阻塞比）約為 2%。模型側風面上游角隅處設置一風壓孔，量測所得的壓力信號作為系統觸發(trigger)信號的依據。壓力孔以內徑 2.0mm 之 PVC 軟管接至 Validy 公司出品之 DP-103 壓力轉換器，而參考壓力採用安裝於上游區皮托管之靜壓。此開孔所量測表面風壓值，主要作為觸發量測資料採認的基準。

4.探針支架：

為架設探針陣列，本研究自行設計製作探針組固定架，固定架本體為高 170 公分的垂直主桿，其上下固定接合處使用兩片 15 公分×15 公分鐵板，配合較大尺寸螺桿連接垂直主桿，並於鐵板四個角落上，安裝高度調整螺絲作為與風洞上下層邊界接合與微調整垂直桿件之相對位置。在垂直主桿待測的位置上，安裝門型之探針固定架，此門型固定架可以依需求鎖定在垂直主桿的任意高程。探針固定架的垂直邊，開孔以容納探針支架(support)，裝設探針支架的開孔中心點與中心點間距 2.5cm，洞徑 0.6cm，並可利用螺絲固定及緊迫夾具。

5.方柱尾跡之量測：

本實驗使用之探針陣列中探針間距 2.5cm，實驗可用 6 支探針，因此將尾流流場分為上半部與下半部兩個區域分別量測。量測上半部區域時，探針組最下緣與模型下緣高程切齊；量測下半部區域時，探針組最上緣與模型上緣高程切齊。由距模型後緣 2 公分開始量測，向下游以 1 公分的間距逐步量測，距離大於 10 公分後，改為每次向下游以 2 公分的間距逐步量測，最遠達 36 公分，亦即九倍的模型寬度。每組量測其採樣時間為 15 秒，採樣頻率 1000Hz，每組實驗均重複三次。

本研究採用之風速有三種，分別為 3.8m/sec(風扇轉速 300rpm)、4.6m/sec(風扇轉速 400rpm)及 6.8m/sec(風扇轉速 600rpm)，以模型寬度 4cm 為基本尺度，推算得之雷諾數分別為 9500、11500 及 17000。

本研究以柱體側風面上游角隅之風壓信號作為觸發信號，取風壓信號在渦散作用最強烈之瞬時作為觸發時間點(T_0)，探針組此瞬時量測得之風速信號將加以紀錄保存，代表流場的切片，流場速度與風壓孔信號時序列資料型態如圖 4.4 所

示。於本實驗之系統設置條件下，每次採樣約可獲得 350~400 組有效的風速資料，利用 POD 分析方法計算其模態，由分析所得的低階模態取得流場中的主要特徵結構。同時利用改變探針組與柱體間的相對位置，可量測與分析得不同空間位置的流場結構，以供繪製成柱體尾流的流場向量圖，本法的優點在於不需大量的同步資料，亦可分析整體速度場的分布。

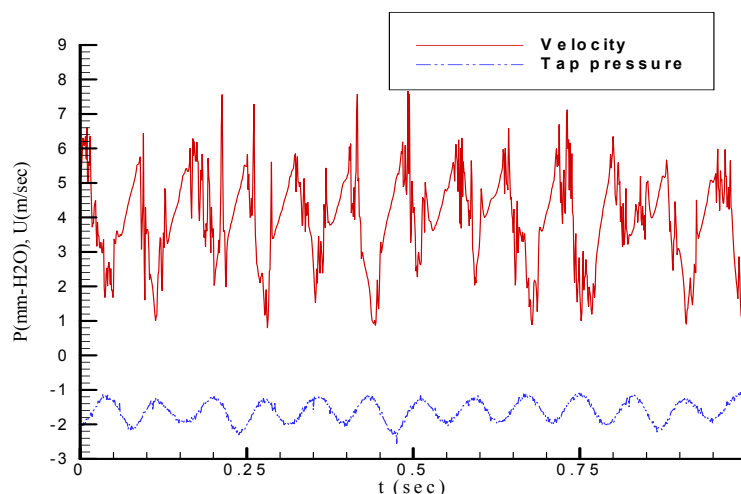


圖 4.4：流場速度與風壓孔信號時序列資料型態(風扇 400rpm，風速量測位置為柱體上緣後方 4cm 處之順流向風速)

4-6 結果與討論

本研究在風扇轉速 600rpm 時量測方柱體尾流流場速度分佈結果如圖 4.4 所示，量測之範圍為柱體後方 $0.5D \sim 9D$ ，同時經由選取不同的時間稽延，可觀察到流場中渦旋向下游傳遞變化的情形。圖中每一點位均代表一支探針量測的結果，由於量測由上半部區域與下半部區域分別量測，而探針間距為 2.5cm、柱體寬度為 4cm，接近圖面中央帶為兩次量測的重疊區，有較密集的點位分布。由圖 4.4 顯示利用 POD 分析可以識別出流場中主要特徵結構，圖 4.5(a)中可見流場向量分布主要是由柱體上方側分離剪力流的捲入為主，而經不同的時間稽延至圖 4.5(d)則顯示柱體下方側分離剪力流的捲入已成為主要流況。由於本次實驗使用 end flow type X 型熱絲探針量測，無法量得逆流(reverse flow)的流速，未來可考慮使用如 cross flow type X 型熱膜探針或裂膜探針(split film probe)等方式加以量測，應可進一步改善量測結果。

選取 600rpm 流場分別在時間 T_0 及經 44ms、84ms 等時間稽延條件所得之方柱尾流速度分布圖如圖 4.6 所示，由圖中顯示各尾流速度場有相當的相似性，由於 600rpm 流場中自由流風速(U)約為 6.8m/sec，而方柱體渦散現象之史特赫

數(Strouhal number, $St = ND/U$) 約為 0.13, 本實驗使用之柱體特徵尺度(D)為 0.04m, 推算渦散頻率約為 22Hz, 因此其時間周期約為 45ms, 與觀測所得流場速度圖重複時間稽延相當近似。

利用探針組量測流場, 由於採樣頻率可輕易達 1000Hz 以上, 配合 POD 分析方法的計算, 可將流場中主要特徵結構識別出來, 且能表現隨時間改變的尾流速度場變化, 功能猶如一部高速攝影機, 同時分析資料具有量化的成果。POD 分析過程可將紊流場中流速隨機擾動部分加以有效濾除, 提供較為清晰的流速分布圖, 應為 POD 分析方法的優點。另一方面, 傳統利用煙流及高速攝影機的可視化技巧, 在高雷諾數流場中, 往往因煙流變化過快或照明系統不足以應付更高速的攝影取樣, 造成不易成像的問題, 利用探針量測配合本研究分析方法, 應可改善此一現象。

轉速 300rpm 條件下方柱體尾流區速度場變化如圖 4.7 所示, 分上半區域與下半區域量測, 範圍並向下游延伸 0.5D~6D。由於風速較低, 渦散頻率亦較低, 圖中選用的時間間隔雖為 8ms, 渦旋向下游移動變化仍緩慢。

轉速 400rpm 條件下方柱體尾流區速度場變化如圖 4.8 所示, 分上半區域與下半區域量測, 範圍並向下游延伸 0.5D~6D。選用的時間間隔亦為 8ms, 圖中所顯示的渦旋向下游移動速度較圖 4.7 略為快速。

4-7 結論

本計畫開發出利用探針陣列量測柱體尾流速度場技術, 並配合 POD 分析方法, 可有效的識別出柱體尾流速度場中特徵結構, 由本計畫之實驗結果顯示本方法優點包括:

1. 可克服流場中隨機擾動信號的干擾。
2. 可高速採樣取得流場中迅速而微細的變化情形。
3. 可在高雷諾數流場中持續量測速度場變化。

本技術未來應可供不同斷面柱體尾流、地形風場、建築物尾流等多種流場觀測實驗中應用, 其結果並可與高速攝影機相互驗證。

本計畫於進行中顯示探針可否量測得逆流十分重要, 未來如改採用具備更佳方向性能的探針進行量測, 應對提升量測結果甚有裨益。本方法對於流場中易出現的小幅隨機擾動信號可有效的加以濾除, 但對此類信號的抵抗性能則仍有待更進一步實驗加以驗證, 以提升於紊流場中量測尾流之能力。

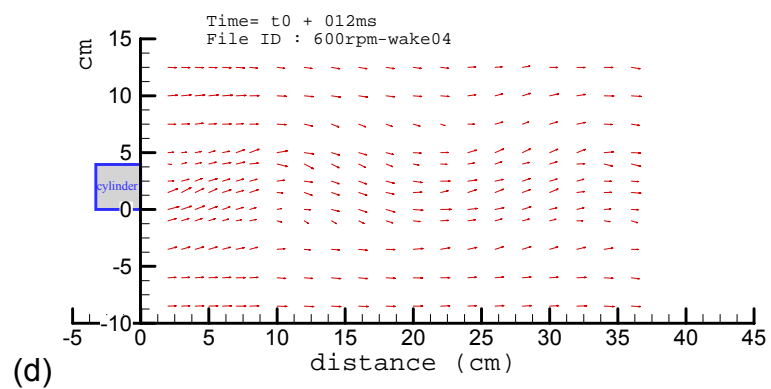
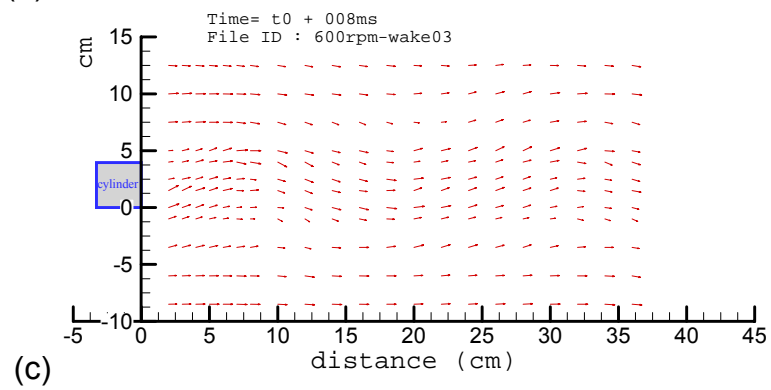
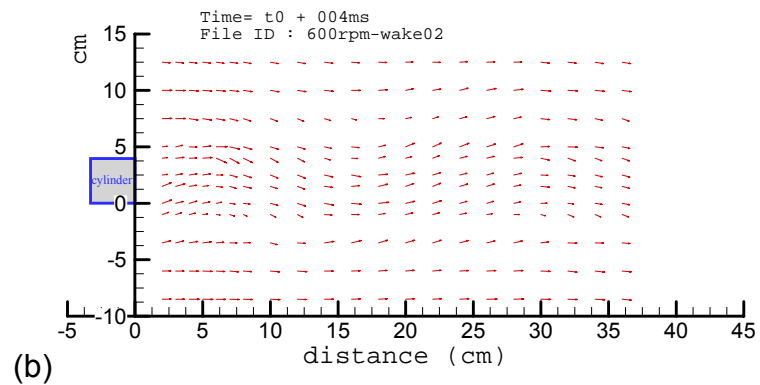
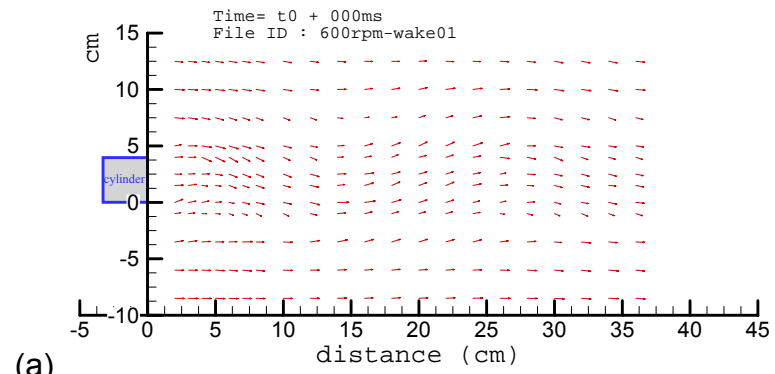


圖 4.5：方柱體尾流區流場連續變化圖形，時間間隔 4ms。

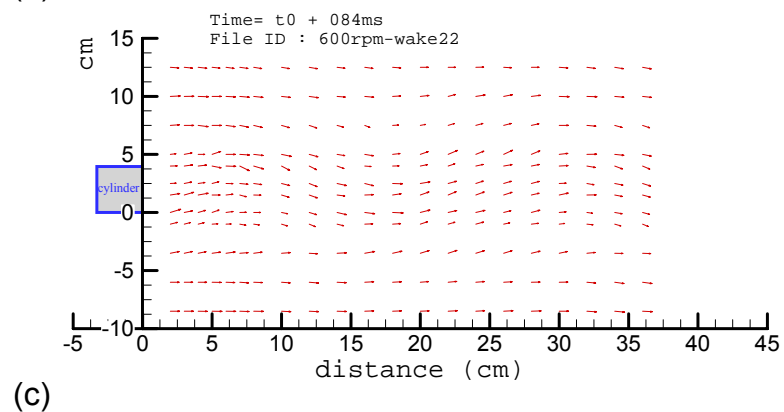
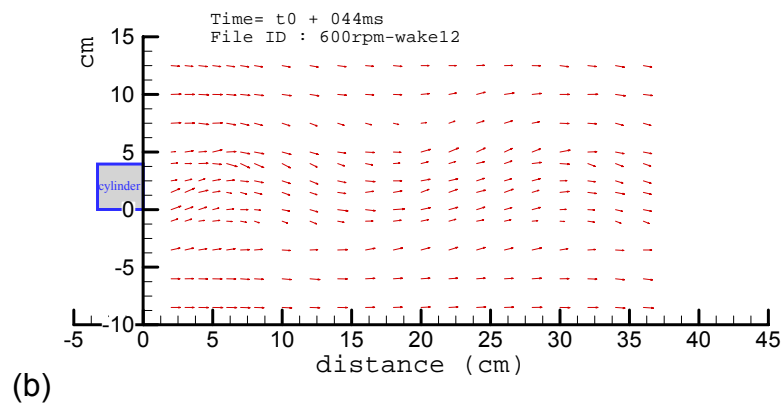
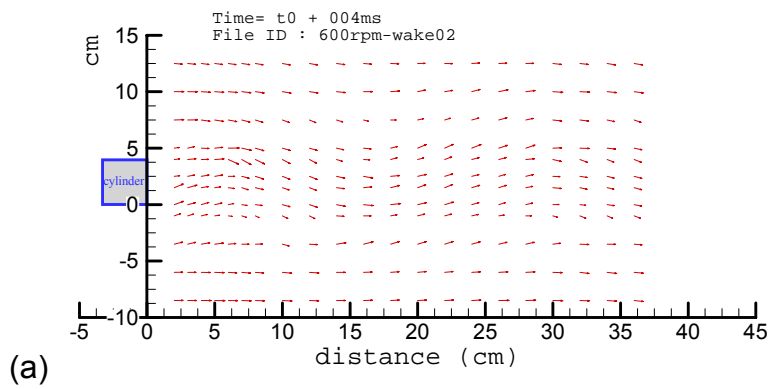


圖 4.6：方柱體尾流區流場時間間隔約 40ms 之流速分布圖。

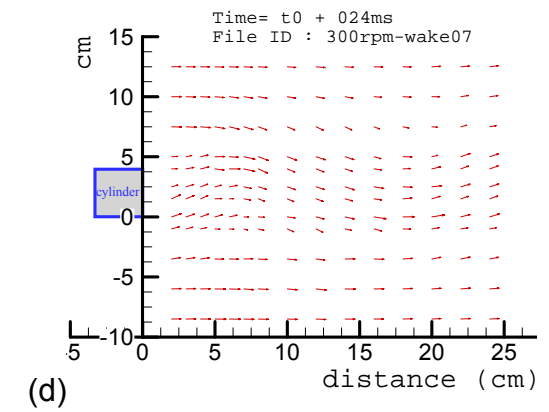
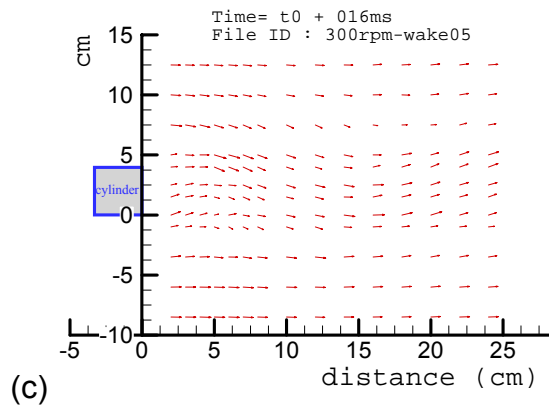
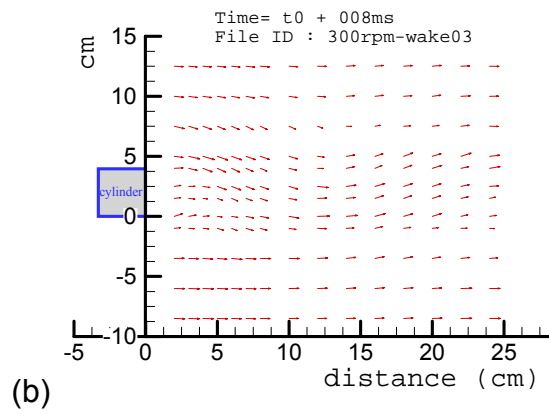
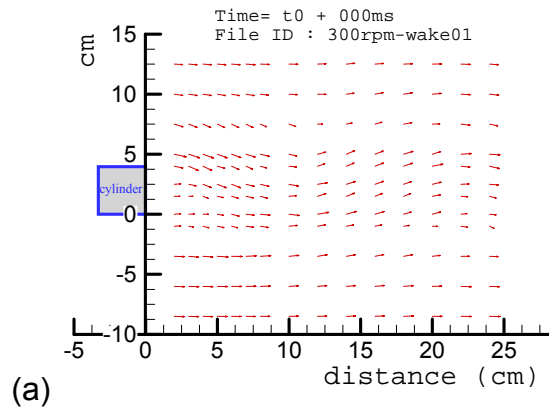


圖 4.7：風扇轉速 300rpm 時方柱體尾流區流場連續變化圖形，時間間隔 8ms。

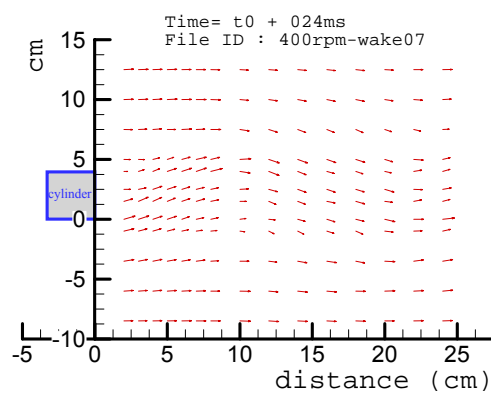
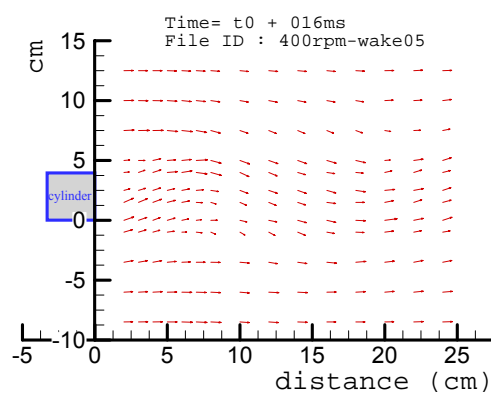
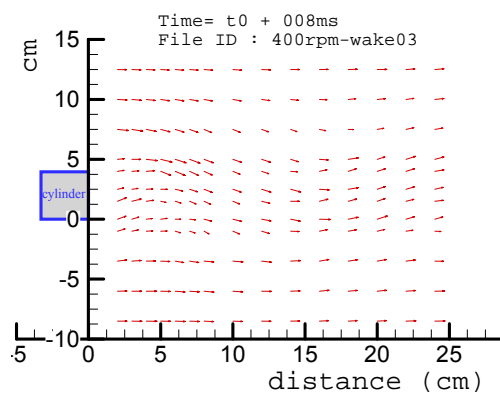
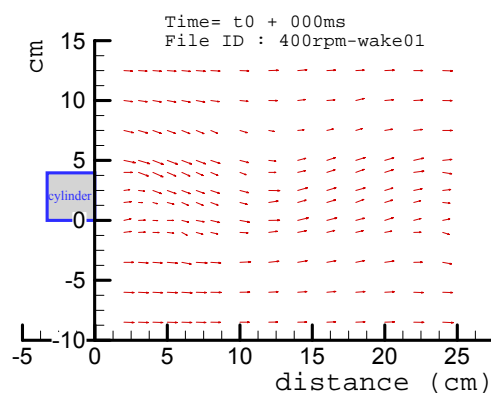


圖 4.8：風扇轉速 400rpm 時方柱體尾流區流場連續變化圖形，時間間隔 8ms。

4-8 參考文獻

- 4-1. Luo, S.C. , “Vortex Wake of a Transversely Oscillating Square Cylinder : A Flow Visualization Analysis”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.45,1992.
- 4-2. Batill, S.M. & T.J. Mueller, “Visualization of Transition in the Flow over an Airfoil Using the Smoke-wire Technique”, AIAA 80-0421R, Vol.19, No.3, 1981.
- 4-3. Patte-Rouland, B. , G. Lalizel, J. Moreau and E. Rouland, “Flow analysis of an annular jet by particle image velocimetry and proper orthogonal decomposition”, Measurement Science and Technology, Vol.12, 2001, p.p.1404-1412.
- 4-4. Sullivan, P. and A. Pollard, “Coherent structure identification from the analysis of hot-wire data”, Measurement Science and Technology, Vol.7, 1996, p.p.1498-1516.
- 4-5. Kopp, G.A., J.A. Ferre, F. Giralt, “The use of pattern recognition and proper orthogonal decomposition in identifying the structure of fully-developed free turbulence”, Journal of Fluid Engineering, Vol.119, June 1997.
- 4-6. 劉佳興，盧博堅，朱樹勳，「主動脈雙葉片人工心瓣放大模型之流場研究」，中華民國八十四年醫學工程科技術研討會，成功大學，1995，第 211-214 頁。
- 4-7. 劉佳興，盧博堅，朱樹勳，1996，「三種雙葉片人工心瓣脈動速度場及紊流應力分佈之比較」，民國八十五年醫學工程科技研討會，台北，第 56-59 頁。
- 4-8. 黃俊宏，「均勻紊流場中二維振動方柱尾流特性研究」，淡江大學水資源及環境工程研究所碩士學位論文，1995。
- 4-9. Delville, J., “ Characterization of the organization in shear layers via proper orthogonal decomposition,” Applied Scientific Research, 1994, 53:263-281.

- 4-10. Gordeyev, S.V. " Investigation of coherent structure in the similarity region of the planar turbulent jet using POD and wavelet analysis," Ph. D. Dissertation, University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana, 1999.
- 4-11. Delville, J., Ukeiley, L., Cordier, L., Bonnet, J.P. and Glauser, M. " Examination of large-scale structure in a turbulent plane mixing layer. Part 1. proper orthogonal decomposition," Journal of Fluid Mechanics, 1999, Vol. 391, pp.91-122.
- 4-12. Citriniti, J.H., George, W.K. "Reconstruction of the global velocity field in the axisymmetric mixing layer utilizing the proper orthogonal decomposition", Journal of Fluid Mechanics, Vol.418, Sep. 2000, pp137-166.
- 4-13. Gordeyev, S.V., Thomas, F.O. "Coherent structure in the turbulent planar jet. Part I. Extraction of proper orthogonal decomposition eigenmodes and their self-similarity", Journal of Fluid Mechanics, Vol.414, Jul. 2000, pp145-194.
- 4-14. Gordeyev, S.V., and Thomas, F.O. "Coherent structure in the turbulent planar jet. Part 2. Structure topology via POD eigenmode projection," Journal of Fluid Mechanics, 2002, Vol. 460, pp.349-380.
- 4-15. Tamura, Y. and S. Suganuma, "Proper Orthogonal Decomposition of random wind pressure field", Journal of Fluid and Structures, Vol.13, 1999, pp.1069-1095.

第五章 風工程計算平台之建構

5-1 計畫概述

風對結構物的作用是複雜的空氣動力學問題。過去在工程設計上對於結構物抗風設計還不如對抗震設計般的受到重視，其中一個原因是對於中低高度的結構物而言，風的作用在工程設計上並不十分具有影響。伴隨著高聳結構物與長跨距橋梁的出現，抗風設計就顯得非常重要。對於不同形式的各種結構物及橋梁而言，風對結構物及橋梁的某些局部作用也應而受到普遍的重視。我國為海島地形，常容易受到颱風的侵襲，風災問題也應而逐漸被重視。在下表中將說明，空氣動力作用的種類，結構物相對反應的物理現象以及結構物的損害類型。

表 5.1 風對結構物的作用

空氣動力作用的種類	結構物相對反應的物理現象	結構物的損害類型
(1)時間平均的空氣動力作用	靜力風壓引起的變形，應力，應變位移	整體變形、破壞、局部變形損傷
(2)紊流產生的瞬時空氣動力作用	隨機振動(抖振)	局部變形損傷、功能障礙造成使用者不舒適、不安全感
(3)結構物尾流中發生的渦流產生的瞬時空氣動力作用	特定風速範圍內發生的周期性有限振幅振動，自然頻率共振	局部變形、損傷、疲勞、功能障礙造成使用者不舒適、不安全感
(4)由結構振動反饋的瞬時空氣動力作用	超過臨界風速時負阻尼產生的發散自然頻率共振	破壞、破損

5-2 風工程計算平台建構

根據以上對於風工程的說明，可以充分瞭解風力作用對結構物的影響與各種複雜的物理現象，為達成強化本校「大氣環境暨風力工程研究中心」以計算流體力學為基礎的研究能量工作目標，本計畫第一年已完成「風工程計算平台」之建構，風工程模擬系統包括了硬體計算環境建製與計算軟體系統安裝兩大部分，各項執行進度分別如下：

5-2-1 硬體部分

三部計算平台主機建製，分別為兩部 Intel P4 2.53G 計算平台作為前處理理網格產生系統與計算流體力學系統，一部 AMD K7 XP1800 計算平台作為後處理可視化分析系統使用(詳細規格如下)。

Intel P4 2.53G 計算平台：

組件名稱	廠牌型號	備註
中央處理器	Inter Pentium 4 2.53G	
主機板	GA-8STL	
記憶體	Apacer DDR 333 512MB x2	1GB
顯示卡	Gainwin 220T	Gforce 3 TI 64MB
網路卡	RTL-8193d	
硬碟	Seagate ST380021A	80G 7200 rpm
燒錄機	LITE-ON 40X	
軟碟機	MITSUMI 1.44	
顯示器	Viewsonic P90f	
滑鼠鍵盤	IBM	
電源供應器	偉訓 300 W	
不斷電系統	台達 LC-500	500VA
作業系統 OS	Red Hat Linux 7.3	

AMD AMD K7 XP1800 計算平台：

組件名稱	廠牌型號	備註
中央處理器	AMD Athon XP 1800+	
主機板	MS-KT3 Ultra2-c	
記憶體	Apacer DDR 333 512MB x2	1GB
顯示卡	Gainwin 220T	Gforce3 TI 64MB
網路卡	RTL-8193d	
硬碟	Seagate ST380021A	80G 7200 rpm

燒錄機	LITE-ON 40X	
軟碟機	MITSUMI 1.44	
顯示器	Viewsonic P90f	
滑鼠鍵盤	IBM	
電源供應器	偉訓 300 W	
不斷電系統	台達 LC-500	500VA
作業系統	Windows XP Professional	

上述三部個人計算平台主機已於 91 年 10 月完成採購程序，並分別安裝 LINUX Redhat 7.3 與 MicroSoft WINDOWS XP 作業系統。目前放置地點為風工程中心 212 研究室。

5-2-2 軟體部分

- (1) . 前處理網格產生系統：泛用型網格建立系統 ICEM-CFD 軟體，
- (2) . 計算流體力學系統：泛用型熱流分析 Star-CD 軟體，ICEM-CFD 及 Star-CD 軟體已於 91 年 11 月完成採購程序，並安裝完成及軟體測試與教育訓練工作。
- (3) . 後處理流場可視化軟體系統：泛用型流場可視化 Tecplot 軟體，已於 92 年 1 月完成採購程序，並安裝完成及軟體測試與教育訓練工作。

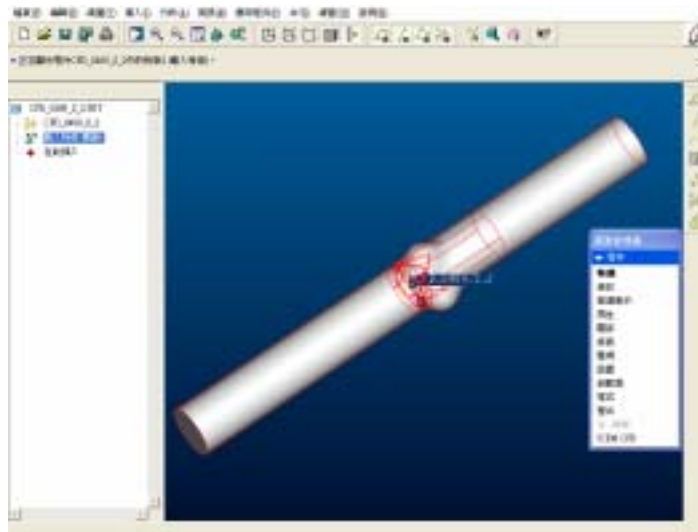
軟體名稱	版本	備註
Star-CD 泛用型計算流體軟體	V3.150	Intel P4 2.53G 計算平台
ICEM-CFD 泛用型網格建立系統	V4.2.2	Intel P4 2.53G 計算平台
Tecplot 泛用型流場可視化軟體	V9.2	AMD K7 XP1800 繪圖平台

5-2-3 風工程模擬系統軟體之測試

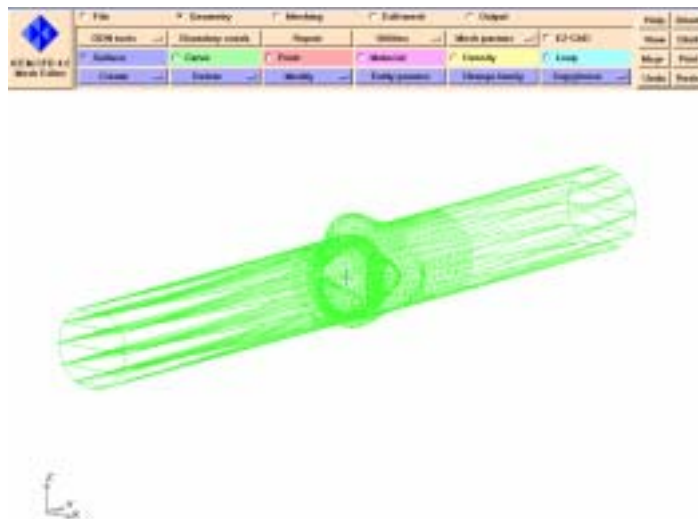
(1). ICEM-CFD 泛用型網格建立系統之測試：

- i. 三葉瓣人工心臟瓣膜網格產生測試程序，使用 ICEM-CFD 之步驟如下：

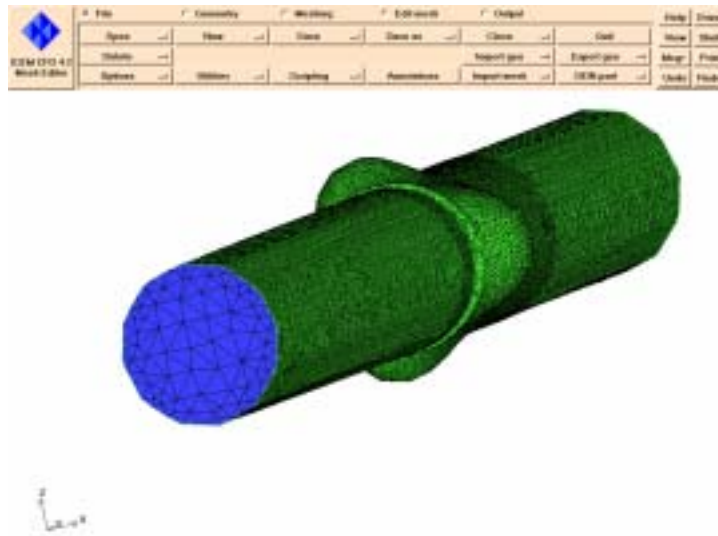
a、使用 CAD 軟體 Pro-Engineer 系統建立模型三維幾何外型：



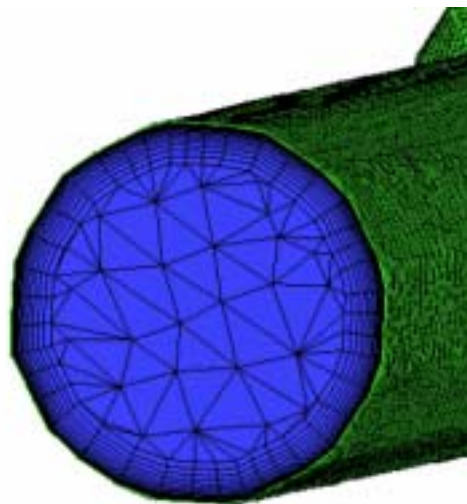
b、將 Pro-Engineer 之 CAD 模型轉換成為 ICEM-CFD 泛用型網格建立系統可讀取之 TIN 檔案格式：



- c、 使用 ICEM-CFD 泛用型網格建立系統中之網格參數 (MESH PARAM) 定義網格大小與性質；再使用 TETRA 網格產生器，以網格自動產生方式生成所需要的基本網格。

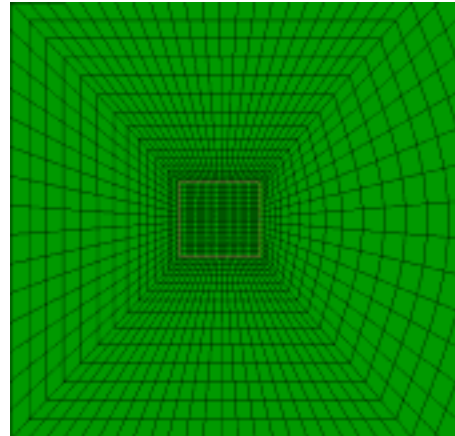
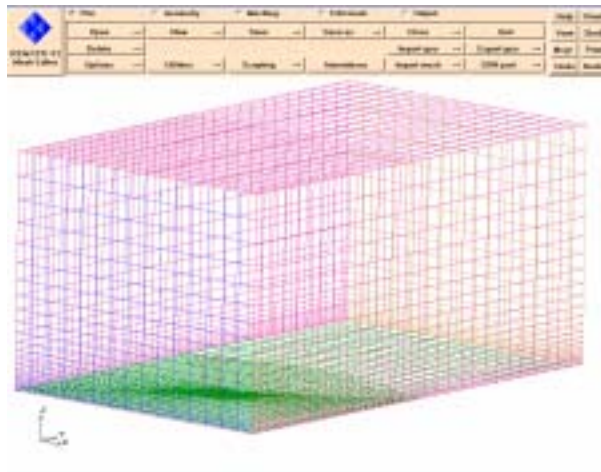


- d、 利用基本網格分佈進行必要的檢查與修補程序：修改網格品質再進行局部加密或修補之動作（例如：鄰近壁表面處等）。



- ii. 三維鈍體計算流場之網格產生程序：

使用 ICEM-CFD 泛用型網格建立系統之 Hexa 之網格生成模組功能，產生是符合幾何外型的數個正交計算區塊，再進一步生成所需要的基本網格分佈。

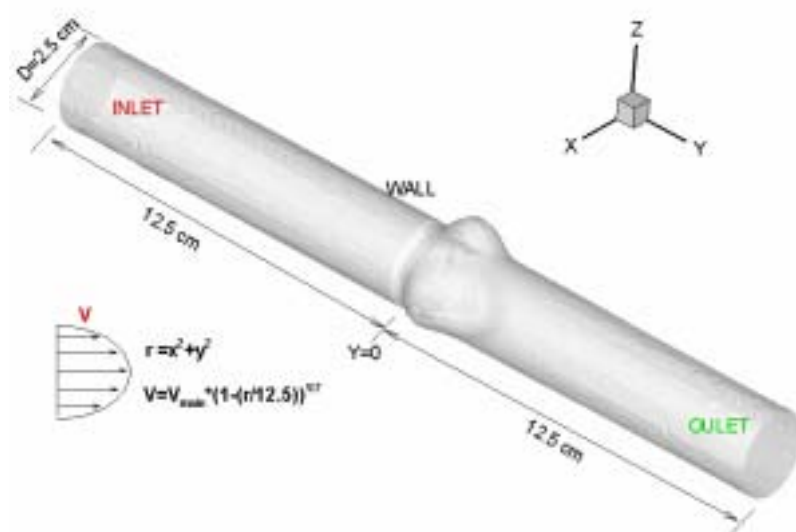


(2). Star-CD 泛用型計算流體軟體之測試與實際應用

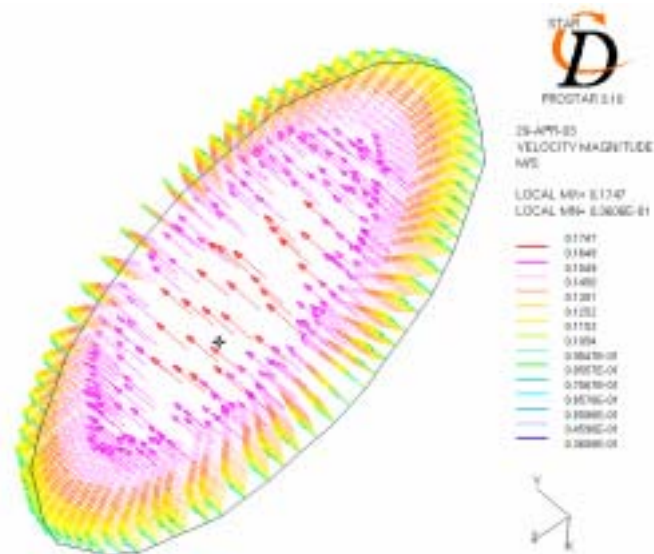
iii. 三葉瓣人工心臟瓣膜之數值模型計算程序：

在三葉瓣人工心臟瓣膜其瓣膜前後各分佈加 10D 之延伸管道（其中 D 為管道直徑， $D=2.5\text{cm}$ ），入流邊界位於 $y=-12.5\text{cm}$ 平面處，出流邊界位於 $y=12.5\text{cm}$ 平面處，計算介質為：水。邊界條件設定：入流邊界：使用 1/7 power law 的管道邊界層入口邊界，壁面邊界採用壁函數紊流模式，主流速為 $V_{\text{mean}}=0.25\text{ m/s}$ 。

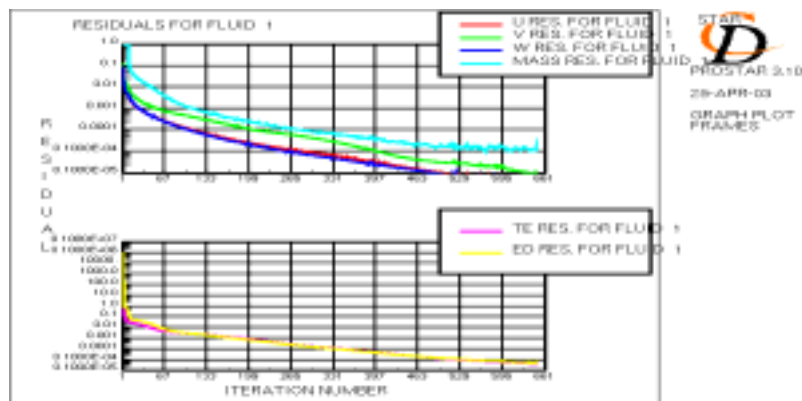
a、計算域模型：



b、入流速度分佈圖：



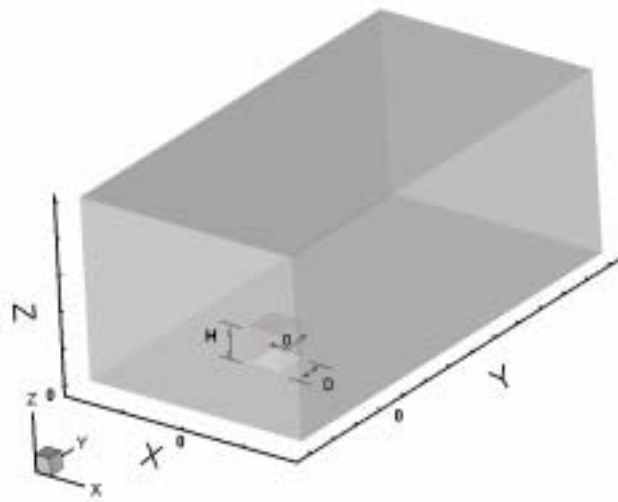
c、計算過程收斂圖：



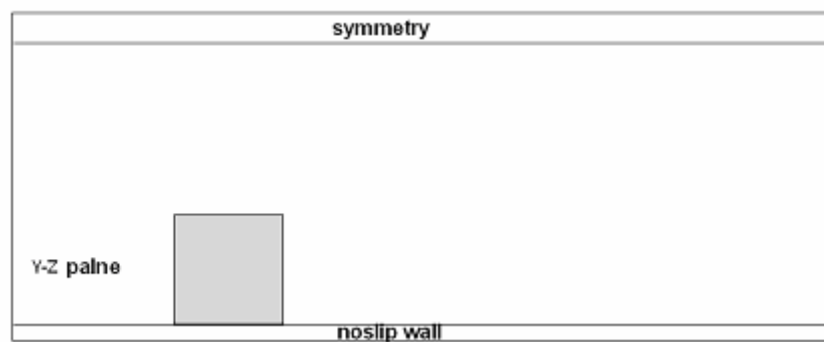
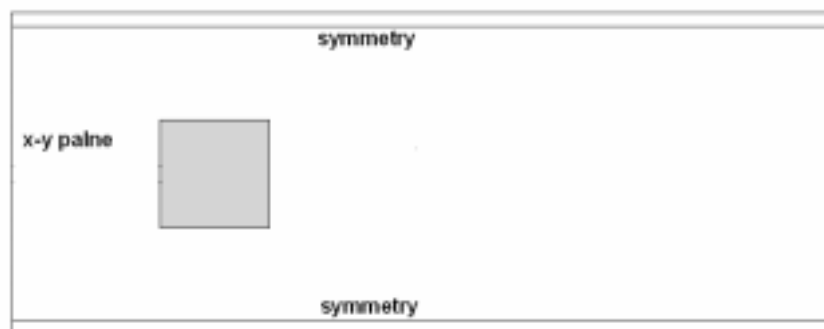
iv. 三維鈍體計算流場之計算程序：

流場中放置一方柱寬為 D 、高為 H （其中 $H/D = 1.446$ ），入流位置為 $y = -3D$ ，出流位置為 $y = 10D$ ，兩側對稱邊界位置為 $x = \pm 6.5D$ 。在方柱周圍及近壁面部分網格局部加密，網格數為 58000。紊流模式分別採用 $k-\epsilon$ high Re、CUBIC high Re、Quadratic high Re 及 RNG 模式。計算流體使用室溫常壓之空氣，密度為 1.205 kg/m^3 ，黏滯係數為 1.81×10^{-5} ，使用 1% 之入流紊流強度及 0.05 長度尺度，收斂條件設定為 10^{-7} 。邊界條件設定，入流速度剖面採用實驗數據所得之速度曲線，即邊界層流場為 $U = e^{0.215715467854 \cdot \log(y) + 2.09785418652}$ 。

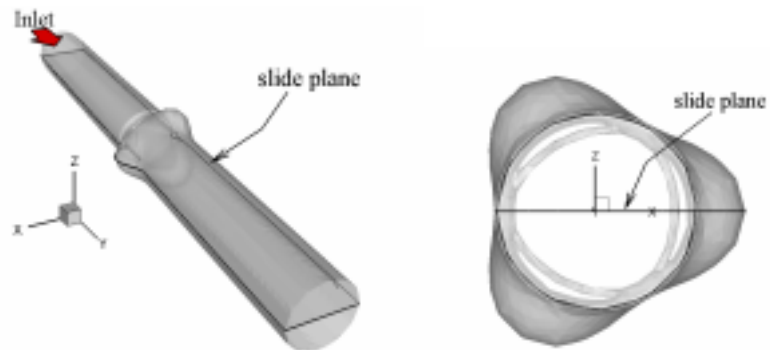
a、計算域模型：



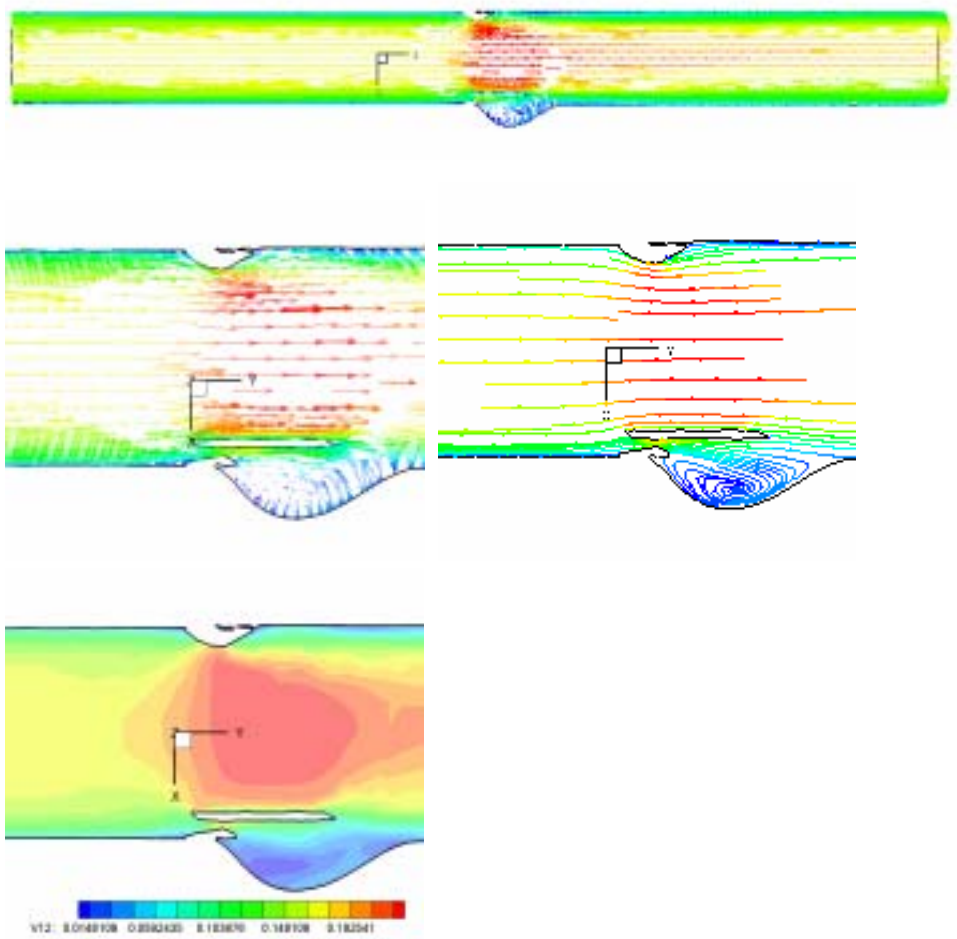
b、邊界條件：



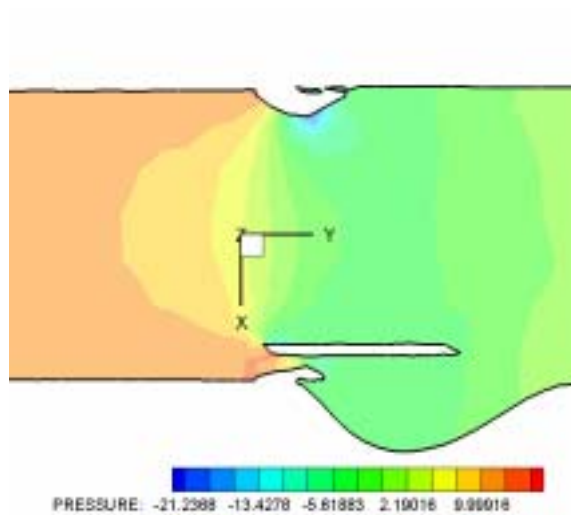
- (3). Tecplot 泛用型流場可視化軟體之測試與應用：
- v. 三葉瓣人工心臟瓣膜之數值模型後處理程序：



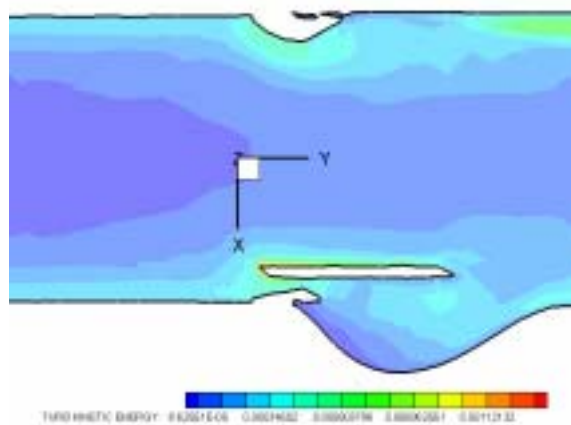
a、速度場分佈圖：



b、壓力分佈圖：



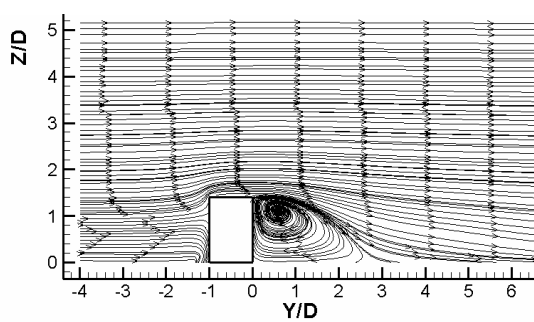
c、紊流 kinetic energy 分佈圖：



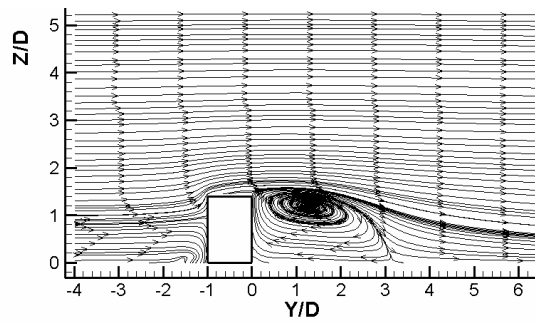
d、紊流黏滯係數分佈圖：

vi. 三維鈍體計算流場之數值模型後處理程序：

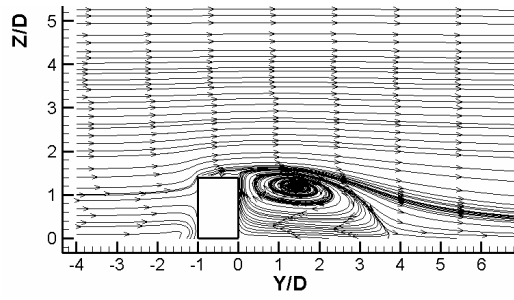
a、方柱中心線之流線圖



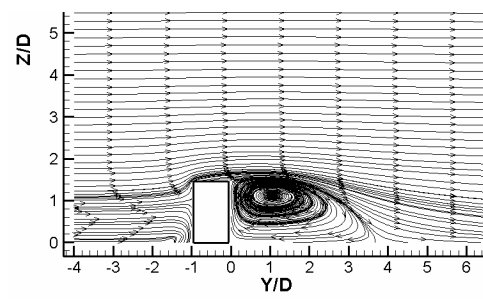
(a) k-e High Re 中心線流場圖



(b) CUBIC High Re 中心線流場圖

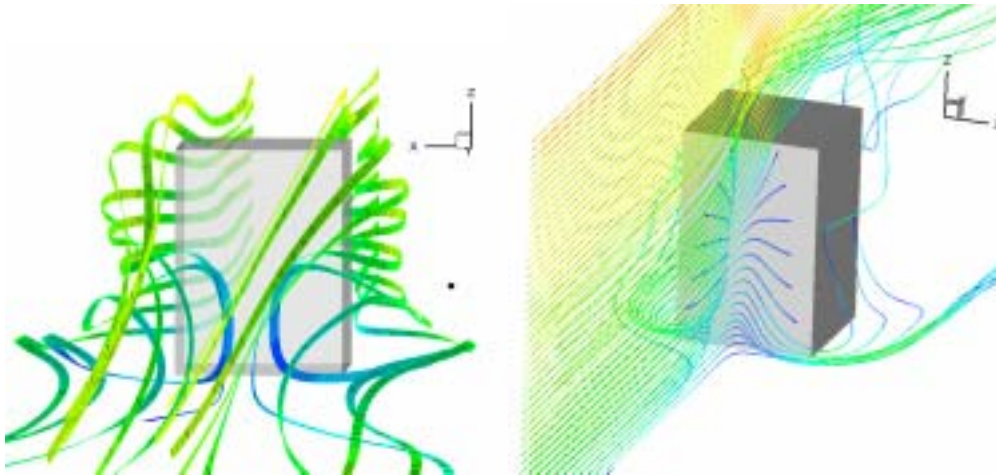


(c) Quadratic High Re 中心線流場圖



(d) RNG 中心線流場圖

b、三維流場之絲帶流線分佈圖



5-3 風工程實際問題之應用

經過第一年風工程計算平台之建立，在建立過程與測試中經由測試案例與分析結果判斷經驗法則的累積，使得吾人在建築物之外流場的數值模擬上有更多的資料背景，作為往後模擬之參考依據。而在求解所使用之求解器 STAR-CD 為一泛用型之數值模擬軟體，故在進行數值模擬時需要具有一定之計算流體力學與風工程之知識，當使用錯誤的邊界條件或錯誤之求解條件將會得到錯誤的結果，而經由數個實際問題的應用，確定風工程數值模擬之程序與相關的邊界條件與初始條件設定。

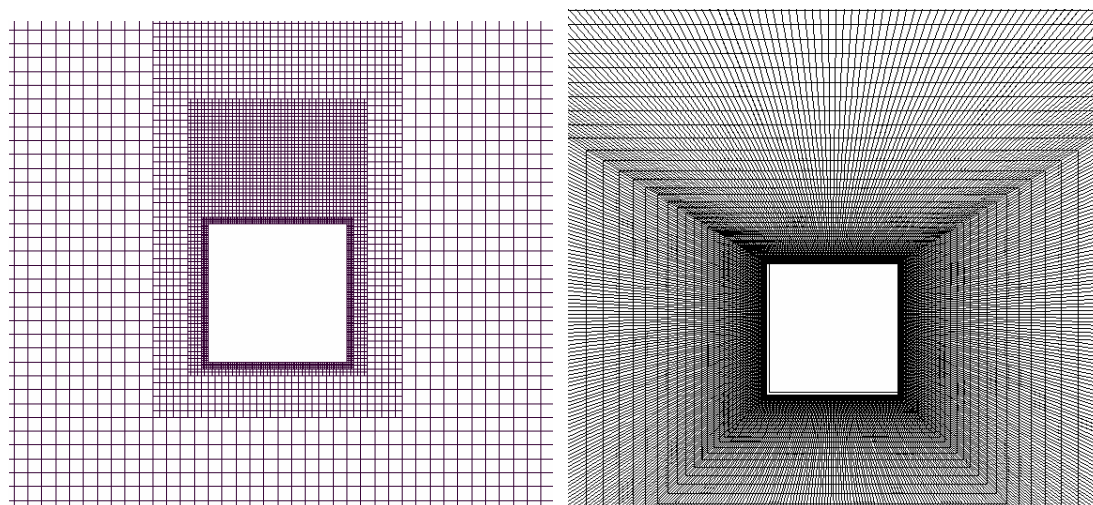
5-3-1 通過二維方柱之渦旋剝離流場

在計算流力的計算中，若能簡化成二維之問題，便由二維流場開始做起，但若所計算之問題中外型將產生三維效應之問題便較不適合簡化為二維。在過去的計算流力由於受限於計算機之能力與商用軟體較不普及時，二維問題的計算由於具有網格數相對較少、求解項次少，且可快速得到所欲求得之流線與壓力分布。

a. 網格建立：

使用 ICEM-CFD 建立 O-Grid 之網格，使得在近壁面處為較密之網格而，而在本計算初期亦使用過 STAR-CD 內所含之前處理器，使用層層加密之網格建立方式，但由於其雖快速但將會使用網格耦合(couple)增加計算時間，亦增加誤差，而使用 ICEMCFD 雖然比較耗費時間，但卻不會有上述之問題。

b. 網格示意圖：



(a). 正交耦合之網格

(b).O-Grid 連續網格

圖 5.1：二維方柱不同網格比較圖

c.計算結果：

計算結果經 STAR-CD 匯出後由後處理軟體 TECPLOT 處理，積分流場中之向量而得知流線可清楚觀察出，流場通過方柱時分離所產生之分離流與再接觸後產生之回流，而方柱後方之渦漩再接觸點之距離亦足以模擬 3 維之方柱，而藉由壓力分佈的等高線圖可清楚看出方柱周圍流場之壓力分布狀況。

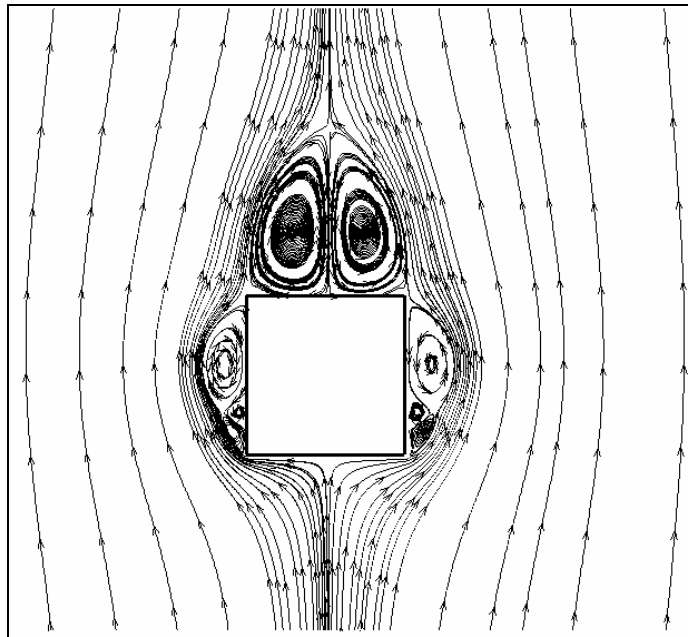


圖 5.2：二維方柱流場流線圖

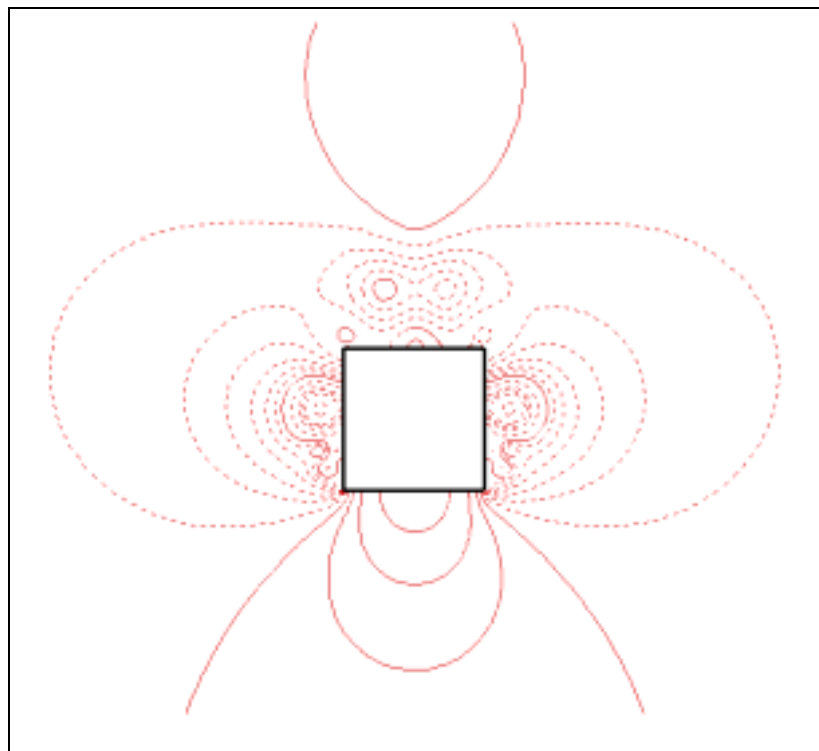


圖 5.3：二維方柱流場壓力等高線圖(虛線為負壓區)

5-3-2 三維方柱的管道流場

三維方柱管流在計算流力上一直是一個標準的測試問題，由於其已經由實驗所得之結果，使得計算流力的結果無法僥倖。三維管流方柱具有幾項特點：(1) 方柱前方近下壁面之馬蹄形窩流與(2)方柱後方之拱門型柱(3)方柱下游之再接觸點位置。

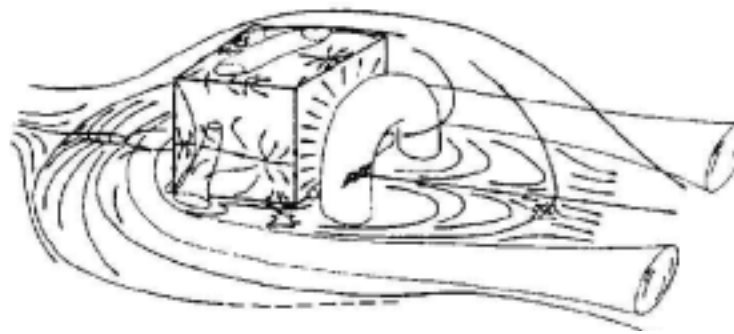


圖 5.4：三維管流方柱特徵流場示意圖

a. 網格建立：

亦使用 ICEM-CFD 使用 Multi-Block 方式建立，在近壁面處使用密度較高之網格，而為避免因為網格過度扭曲而產生之數值不穩定，以及數值傳遞過程中受扭曲網格之影響，故不使用 O-Grid 型態網格，而允許損失部分網格的正交式網格(如網格示意圖)。

網格示意圖：

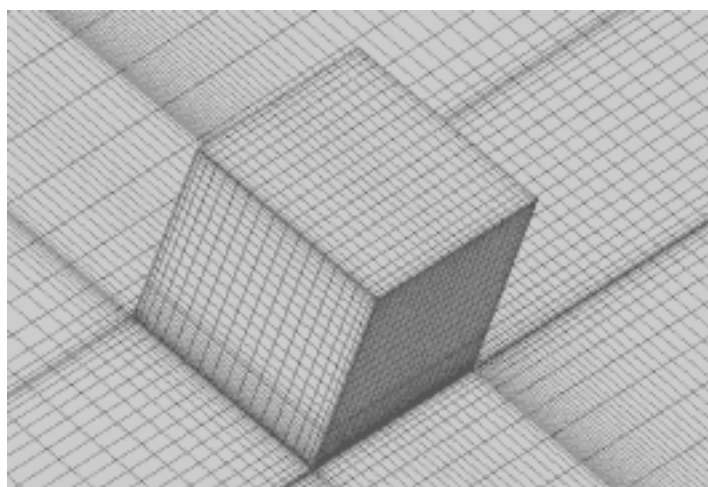


圖 5.5：三維管流方柱網格式意圖

b.結果：

在計算的結果加上後處理後，數值模擬皆可準確且完整的描述出三維管流方柱之流場特性，包括拱門型柱與馬蹄形渦。

流線圖：

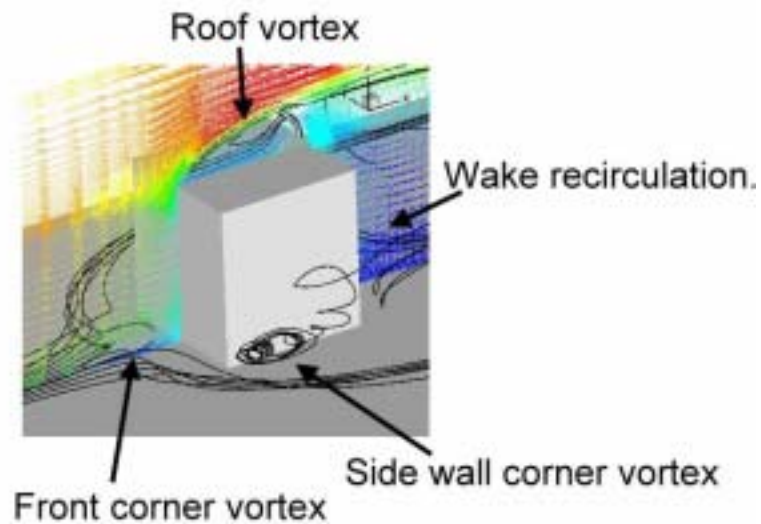


圖 5.6：三維管流方柱之流場特徵圖

等壓力圖：

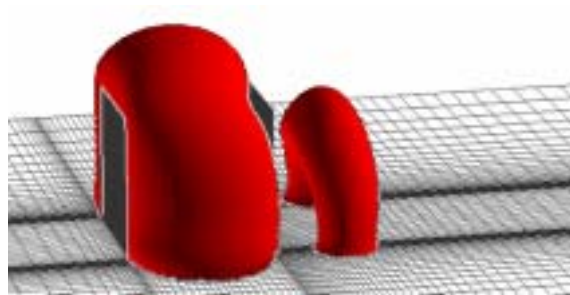


圖 5.7：三維管流方柱後方之拱門型柱

5-3-3 實際風工程結構物之空氣動力特性分析

a. SRI 農舍：

SRI(Silsoe Research Institute)為一國際性之研究機構，位於英國，其提供許多的服務實驗驗證，其中包括基因、醫學、環境工程、風工程……等研究。

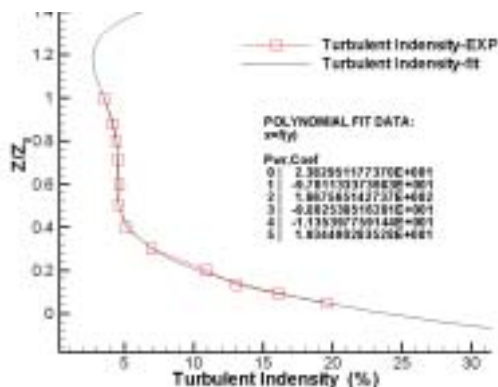


圖 5.8 : SRI 農舍照片

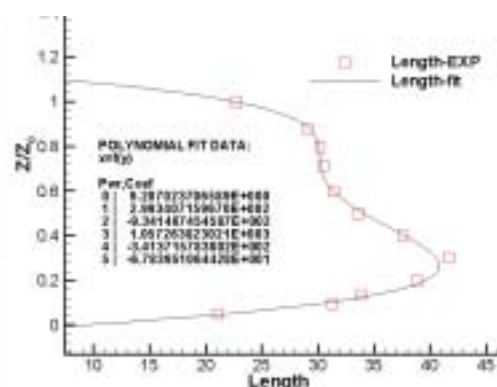
1.邊界條件：

在模擬真實的建築物時為重要亦最為難取得的部分便是入流之邊界條件，在本次所模擬之 SRI 為一實場量測機構，其另一建築物 6m cubic 外牆具有許多感應器，及其迎風面前方設有一整面之條狀量測感測器(如上圖)，可紀錄大氣邊界在 SSB 量測建築物附近之資訊。

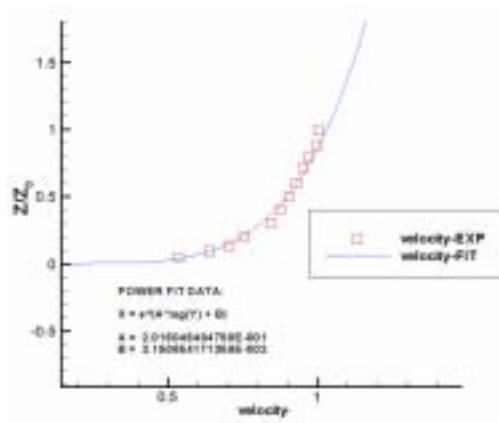
由於大氣邊界目前尚無方程式可完整模擬，而再計算時亦不能無限制的擴大計算域，故取得適當之左右測邊距離，並設定為對稱面假設在面上之流體性質並無梯度，而在上游區使用在實場量測得到之風速，紊流強度等點資訊作為邊界條件，使用 TECPLOT 軟體進行 CURVE FITTING 之動作得到數個曲線方程來代表連續的邊界條件，而在 STAR-CD 中使用副程式 bcdefi.f 讀入邊界條件。



(a)紊流強度



(b)紊流尺度



(c)速度隨高度分布圖

圖 5.9：SRI 農舍數值模擬入口邊界 Curve fitting 圖

2.網格示意圖：

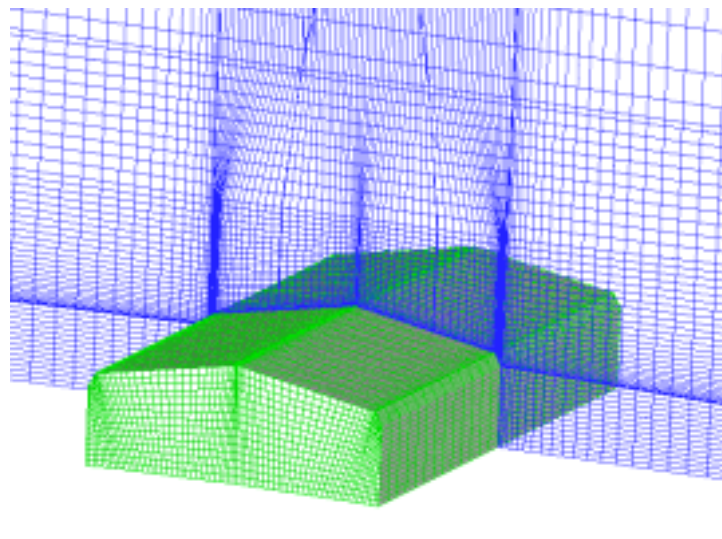


圖 5.10：農舍流場分析網格示意圖

3.流場結果圖：

在農舍迎風面底部具有特殊之前後擺動之流線，而在側面與背風面均有明顯之渦旋產生。

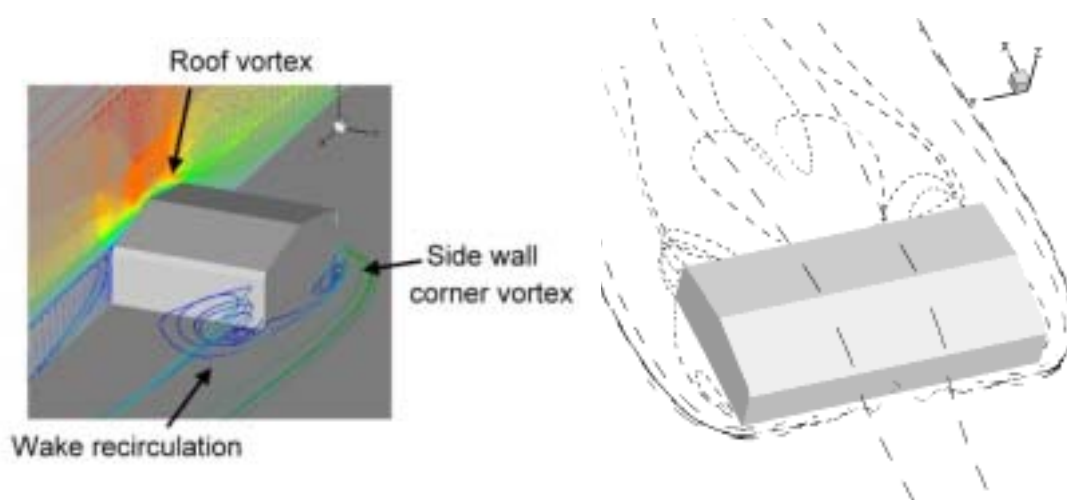


圖 5.11：SRI 農舍流線與柳場特徵圖

b.高層建築：

近年來高層大樓趨亦增加，高成建築所形成之窩旋與週圍流場均會形成不同於低層建築。藉由數值模擬希望得知其氣動外型特性。

High Rise Building



圖 5.12：高層建築外型照片

1.流線圖：

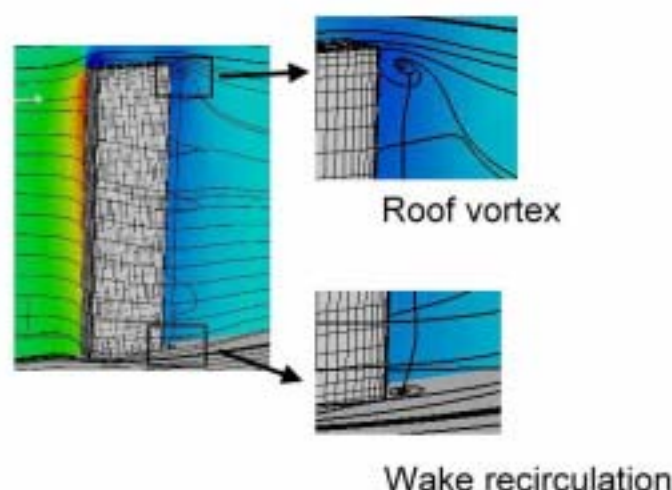


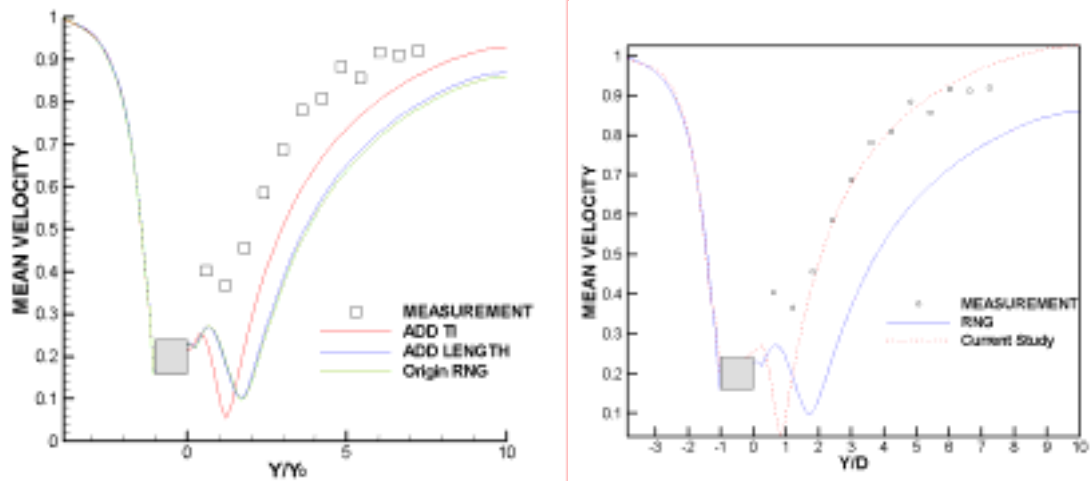
圖 5.13：高層建築流線與流場特徵圖

5-4 風工程計算平台與實驗方法的整合應用

（包括實驗數據與計算初始及邊界條件設定的結合與計算結果與實驗資料的相互驗證及應用）

在過去的風工程研究中，建築物外的風流場皆須倚賴實驗，但每次的風洞實驗便需要許多時間，需要建立實體模型、大氣邊界層之渦旋產生器，且實驗所得之資訊通常為流場中某點之資訊，並非全域的資訊；但在使用風工程計算平台上，雖然可以省去實驗所需耗費之時間與模型建立，但便如同先前所描述之概念，準確且具意義之數值模擬結果取決於正確之邊界與初始條件，而實際之邊界條件便需要使用風洞實驗或是實場量測之結果來進行，本次的模擬配合淡江大學風工程中心進行，使用風洞中所量測之入流邊界條件進行數值模擬。而實驗部分亦量測數個阻礙物後方相同高度沿流場方向之速度分布，最後數值與實驗進行比較，並檢討數值誤差之原因。

原始使用實驗之入流邊界搭配 RNG 紊流模式進行計算，但其結果與實驗之中心截面速度有些許差距，而在經過考慮實驗與數值模擬之差異，由於在數值模擬中唯一理想狀態，故進行修正入口邊界之初始條件。



(a)遠始曲線與初步修正之比較圖 (b)最後修正曲線與實驗之比較

圖 5.14：阻礙物後方流場中心剖面之速度曲線比較圖

經過一連串的數值模擬風工程中建築物之流場特性，顯示出計算流體力學在風工程研究上的能力與風工程計算平台建立的可行性。未來希望計算更多有實驗數值比較之問題，或是進行更多實際之問題，達到節省時間與流場全域解之目標。

第六章 結構風工程知識管理平台之發展

6-1 前言

知識經濟的浪潮近年來不斷的衝擊著我們使人應接不暇。在新經濟的時代中，知識管理（KM）乃是最常被提及的話題。從企業組織的內部資訊效率與創造性的提升到新知識的擴散與加值，知識管理均是主要的運作工具；知識管理在商業與非商業的領域中支援知識的擷取與轉移，在土木工程領域裡，知識管理可以用來管理大型的資料庫與知識庫，就是用來擷取、分享和再利用工程設計的方法、工程施作的方式與專案計畫的進行等等。在風工程的研究領域裡，知識管理可用來管理大型的風洞實驗資料庫與知識庫，分析程式與計算工具，設計規範與標準等。

淡江大學風工程研究中心的研究內容完整且豐富，研究團隊的成員眾多，在此龐大的研究體系下，需要一套有效率的管理方式以進行研究知識的擷取、編撰與轉移；本研究即承襲上述概念，分析結構風工程知識管理之需求，建立知識管理之網路基礎設施，利用 ZOPE 與 Open Webmail 等軟體技術，發展一個整合性的結構風工程知識管理工作平台系統。

6-2 研究目的

近來知識管理的措辭被過度的使用，對於不同的人它代表不同的事物，知識管理只是個廣義、概念性的說法，它涵蓋許多不同的活動：從顧客關係管理到文件管理、從企業資源的規劃到群體化的軟體、從商業法則到專家系統、從知識的入口網站到智慧化的搜尋、從資料的堆疊到資料的擷取 等等（6-1）。

本研究的目的是發展一個整合性的結構風工程知識管理架構，以便於管理大型的風洞實驗資料庫與知識庫，分析程序與計算工具，設計規範與標準等。並將專家的經驗知識、實驗流程、分析方法置於其中，整合所有的資料與相關的資訊系統，並提供一個友善的網路介面來支援整個研究團隊的聯繫與資料交換，提昇協同研究的工作效率。同時系統亦將提供研究成果展示的功能和諮詢，可有效的推廣本研究團隊在結構風工程領域的研究成果。

6-3 知識管理介紹

6.3.1 知識的意涵

「知識」一詞的界定，說法不一。有謂是有智之士的思想，有謂是專家獨特的見解，有謂是經驗透過文字的資訊，有謂是經驗的累積（亞裡士多德採此說）；按「說文解字」就文藝上解釋說：「知者，從口從矢，意謂知裡之速，如矢之疾也；識者，一曰之也。」知識二字合則為「意識作用的認識。」佛家法華文句譯為：「聞名為知，見形為識。」

經濟合作開發組織（6-2）（OECD）依經濟性將知識分成四類：

（一）Know-what（知事）

即關於事實認知的知識；例如律師、醫師、會計師、工程師等於專業領域的知識，與一般所稱之資訊意義接近。

（二）Know-why（知因）

即關於科學原理以及自然規律的知識，此亦為我們從小到大接受教育時所學習與吸收的部分；例如研究實驗室所產生之新技術與創新應用知識，這類知識是產業進步與創新發展的最要基礎。

（三）Know-how（技能）

即從事業務的技巧、秘訣、竅門與能力，專業技術工作者或知識工作者所必需的專業能力與知識。

（四）Know-who（知人）

即那些人有特殊專才的知識及特殊社會人脈關係，好比是「人才與技能資料庫」般，可充分運用組織內外的專家與專長知識，在今日是日益重要與受到大部分人的期盼。

6.3.2 知識管理的定義

隨著電腦及自動化機具逐漸取代重覆性工作，非技術性工作者工作機會漸漸被裁減，取而代之的是以專案導向的專業技術人員與專案管理人員。每一個案面對的時空條件不同，作業流程及遭遇之問題均不相同，此為專案管理的特性。如

何在有限的時間及成本內，尋得較佳的解決方案，成為專案的重要課題，此種以尋找、創造新知識的新型態工作者，稱之為「知識工作者」。

知識管理理論發展的初期，認為「知識」有助於提高決策品質、改善生產品質，是土地、勞力、資本、管理後的第五項生產要素。而近來所討論之知識管理，則側重如何引導知識工作者研發新技術、新產品，並提昇團隊工作效率。

知識管理的過程是首先創造新知，新知的創造可來自於組織內部或外部，組織內部知識創建的过程可以經過學習史家、研究發展、經驗累積、邊做邊學；外界知識的來源可以是從供應商、顧客、及競爭者。如何「有系統地創造新知」是知識管理的第一大挑戰，因為大多數員工都習慣於做相同的事情，視創造新知為畏途。知識管理的第二個挑戰在於如何將的知識「分類編碼」(Codification)，分類編碼是知識管理必備之要件，唯有加以分類編碼才可能將知識成為資料庫供全企業員工查詢，以加速知識的擴散。

知識管理的第三步驟是擴散新知識。就算建構了新知識、準備了知識庫，如果員工在工作上不使用也徒勞無功。因此知識管理必須要建立誘因機制，讓員工願意使用所建構的知識庫。知識管理的第四個挑戰是知識管理的組織及配套的誘因機制。其實知識管理最根本和最嚴重的問題在於誘因機制，組織內如何建立誘因機制，使員工願意分享知識，應用知識是知識管理上最重要的一環。簡單的說，知識管理（6-3）就是：

$$KM = (P + K)^S$$

P：people（人），知識運載者

K：Knowledge（知識），資料、資訊、知識、智慧

+：Technology（資訊科技），資訊科技協助知識管理的建構

S：Share（分享）

知識管理的架構包括組織的共享、活用語實踐。資訊科技（+）可以協助知識管理的建構，其優點是「超越時空限制的相互溝通，並累積大量知識並加以活用」，並加速知識管理的流程。

6-4 研究方法

本計畫之研究過程可分為三個重點，第一年為結構風工程知識管理需求之分

析和知識管理網路基礎設施之建立，第二年是整合型知識管理系統程式之撰寫和研發。

6.4.1 結構風工程知識管理需求之分析

結構風工程是一多元化的知識領域，包括試驗程序、試驗數據、結構理論、分析計算、模式判別、法規條文、經驗公式等。淡江大學風工程研究中心是國內第一個以結構風工程為主要研究項目的研究機構，近幾年之內，該研究中心在高層建築風洞試驗、橋樑風工程研究、氣動力結構控制、鈍體空氣動力學、流體計算研究等方面均有許多豐富的研究成果，本研究即以淡江大學風工程研究中心為知識管理實行的對象，進行各項工作需求之探討與研究，研究中心的整體架構可以圖 6.1 的架構圖表示。

本研究在工作平台的設計上，另與研究中心內的「高層建築研究室」的研究組別進行合作，利用網際網路的技術，將高層建築風洞試驗的數據處理與分析進行網路化的動作，並將數據分析的功能整合於知識管理的入口網站，主要功能為模擬高層建築風洞試驗的數據分析流程。

6.4.1.1 協同工作需求分析

風工程研究中心內的研究成員眾多，所研究的內容與項目也是相當繁雜，且由於日漸增多的工作項目中，有許多的研究工作乃是結合不同研究領域而成，所以每一個研究員與其他研究員每日所產生的互動也愈趨頻繁；由於本研究中心的主要成員為淡江大學的專任老師，老師平時除了開設各項課程的工作外，還需指導研究生與大學生進行研究，所以師生間的溝通互動也是風工程中心內重要的課題之一。

本研究在協同工作的需求分析上，將分成兩個方向來探討，分別是相同階層間的協同工作需求與不同階層間的協同工作需求，在研究的期間，我們對於風工程研究中心內的成員進行訪談與調查，並觀察其日常工作所進行的項目，將結果分述如下：

（一）相同階層的協同工作需求

相同階層的定義是指同一身份職稱，或是同一工作單位下的成員，例如：老師與老師之間、研究生與研究生之間、人工智慧組內的成員之間。屬於相同階層的成員間所產生的協同工作，主要包括文章資料的轉移，論文簡報的工作，檔案或網路資源的分享，以及會議的記錄等等。在風工程研究中心內，同儕與同儕之

間平時的互動與感情的聯繫也是相當的頻繁，所以除了研究工作進行上必須要處理例行公事外，還需要有一個公開的討論空間，可讓全體人員都能暢所欲言，討論各種事項。

（二）不同階層的協同工作需求

不同階層的協同工作定義則是指不同身份職稱或不同工作單位間的成員所進行的互動合作，例如：老師與學生之間、氣動力結構控制組的成員與橋樑風工程研究組的成員之間的合作。屬於不同工作階層之間的協同工作項目中，主要包括新聞訊息的發佈、通知，會議時程規劃與紀錄，次要的有研究內容的傳遞、文章、網路資源的分享等等。

研究中心內有許多的研究組別，各組之間的合作研究工作不盡相同，有些研究組別會同時與多個研究組別相互合作，所以各研究組別必須建立許多共同的區域，以利與其餘組別進行資料整合與儲存，且各組別必須有足夠的權限可自行設定共享個區域與共享的原則，因此，在本研究中便以群組的原則進行系統的規劃，且給予各群組足夠的權限進行目錄的設定。

在不同階層之間的溝通模式中，最常使用的方式便是電子郵件(E-Mail)的傳遞，所以必須建立一套便利的郵件收發系統，使中心內的每一位成員都可隨時隨地的收發電子郵件，如此便能讓資訊的傳遞更有效率，研究工作的進行也可事半功倍。

6.4.1.2 知識管理模式的建立

綜合上述風工程研究中心內的知識管理需求分析項目，並且參照知識活動管理工具之特性，在此將研究中心內的知識活動進行統整，以知識管理的模式建立一套適用於風工程研究中心的知識管理系統。首先討論「知識搜尋」的活動裡有關知識的來源與資訊搜尋的方式，並藉由本系統的使用將研究風工程的人員聚集成知識社群，提供彼此分經驗討論與分享的管道，接著在「知識應用」的活動中，本研究討論建立知識管理系統時可使資料流通更為順暢的方式，最後將所有的研究成果收集在「知識儲存」活動的資料庫中。

（一）知識地圖

風工程研究中心內的研究團隊眾多，進行的研究項目也涵蓋風工程許多領域，在知識的來源方面，我們以「風洞試驗資料」、「數據資料處理」、「計算風工程」等幾個項目進行分類，以方便建立風工程研究的知識地圖。

（二）專家系統

近幾年來，風洞試驗室在高層建築與橋樑抗風方面所做的實驗相當多，也累積許多完整的範例與完善的經驗公式，且結構物進行風洞試驗模擬的過程需要時間與金錢，對於土木建築領域中，初步設計一高層建築或大跨度橋樑時，需要立即明瞭結構設計強度的適當性，及受到外力作用時結構的安全性與否，故建立風工程專家系統可利用專業的判斷規則，對資訊作初步的分析及建議。

（三）知識入口

風工程研究中心內有許多的研究人員，每個人的研究工作都有相同與不同的項目，建立風工程研究中心的知識入口網站可利用入口網站內的公佈欄、討論區及相關作業資訊的整合，成為研究中心的資訊搜尋中心；另外，將研究人員的日常工作活動歸納至入口網站的範疇內，也可達成個人化「數位辦公室」的目的，透過網路的連結，每一研究人員可在任何時間、任何地點，利用網際網路瀏覽器進行研究工作的推展。

（四）知識管理系統

在風工程知識入口網站建立後，成員可在系統內進行各項文章發表或檔案儲存，可讓每一成員提供本身的各種顯性與隱性知識於系統內；在累積一定量的資訊後，便需要進行管理的動作，以方便日後進行搜尋與利用，並且將各分散零落的資訊以單一主題的形式呈現，如同雅虎奇摩(<http://tw.yahoo.com>)中將各電子報內相同主題的新聞收集後以一個標題呈現，供讀者連結閱讀。

（五）教育訓練與流程管理

風工程的研究內容包含理論數值分析與物理狀態模擬，在進行風洞試驗後需要研究人員逐步將實驗數據進行程式分析與整理，本系統將針對「高層建築風洞試驗」的數據分析流程建立網路運作的模式，讓相關的研究人員可以隨時進行實驗數據的儲存與分析，實驗結果的內容也可經由網路流程管理的方式快速的取得。

（六）文件管理與資料庫

知識經過內化後便蓄積在個人及組織內部，或在文書化後儲存於文件、電子檔案之中，將組織內部或個人研究知識等大型的資料以結構化的格式儲存於資料庫中，並運用演算法則找出特定目標的統計數據，可提供相關研究人員高效率的資料查詢與利用；風工程研究內容所產生的資料量是相當龐大與繁雜，研究人員每年所建立的研究成果文件或電子檔案亦是豐富，所以欲建立完整的知識管理系統必須配合完善的資料庫儲存機制，如此方可建構出最佳的風工程知識庫系統。

6.4.2 知識管理網路基礎設施之建立

本項工作包括軟體之評估與引進、軟體硬體環境之建置、系統功能與規格設定與整體系統模型架構之制訂，詳述如下：

6.4.2.1 軟體環境評估與建置

在軟體的評估方面，首先要決定採用的作業系統，目前伺服器作業系統使用率最高且較為穩定的作業系統為「RedHat Linux」，另外，由於 Linux 的作業系統為自由軟體，可不需負擔採購的費用，故本系統採用「RedHat Linux 7.3」的作業系統，搭配「MySQL」的資料庫系統，可讓系統效能達到最穩定的狀態。結構風工程知識管理平台乃是一知識入口網站的型態，所以本系統欲利用「網站建置系統」進行建置，因此本研究評估三種網站建置套件。最後，本系統選擇 ZOPE 為主要的架站套件，雖然此軟體在國內並不常見，且其所使用的語言也是近幾年才出現，但是 ZOPE 的擴充性遠大於其它套件，在國外已開發許多的功能，所以要安裝其它的模組，如專家系統，也比較容易。

在硬體的評估方面，考慮到本系統為網際網路伺服器，故選擇較高的執行效率與安全性的硬體為佳，所以硬體執行的核心採用 INTEL 的中央處理器 (CPU) 記憶體為 DDR RAM，另外，為了提高執行效率與系統資料的安全性，本系統引進磁碟陣列的功能，以四顆 80GB 容量的硬碟進行 RAID 0+1 的排列方式，當系統在同步讀寫兩顆主硬碟的資料時也可鏡射備份至另外兩顆次硬碟。如此一來，一旦系統主硬碟因故而損毀時可立即更換次硬碟進行運作，使得本系統的運作不致中斷，再加上不斷電系統的使用，相信本系統內的資料應可獲得完善的保護。

6.4.2.2 系統功能與規格設定

系統的功能項目共分成個人、群體與專案三個部分，詳述如下：

(一) 個人功能項目

在個人的功能上，本系統欲建立個人化的「數位辦公室」，使本系統成為風工程研究中心每一位成員的入口網站，在此工作平台上，可以進行個人日常研究所需之工作項目，也可進行管理個人知識的功能，因此個人功能的項目有：「收發電子郵件(E-mail)」、「個人行事曆的安排」、「網路資源的連結」、「檔案資料的儲存與傳遞」等。

(二) 群體功能項目

風工程研究中心是一個研究團隊，每一研究群組之間或群組本身成員之間常

有合作與互動，因此在群體軟體的功能發展上，必須具有完善的群組溝通管道，以及群體合作的功能，所以在群體的功能項目上有：「新聞 訊息與事件的發佈」、「文件、檔案的資源分享」、「網路資訊的傳遞」、「會議通知與紀錄」等。

（三）專案解決功能項目

除了個人與群體的知識管理功能外，本研究另與高層建築研究團隊合作，嘗試將高層建築風洞試驗的數據分析流程進行網路化，以建立網路工作平台，此專案的功能項目如下：「模型資料的新增、查詢與修改」、「實驗資料的新增、查詢與修改」、「伺服器端程式分析的執行」、「風力係數的查詢」、「風力頻譜圖形之繪製」等。

6.4.2.3 工作平台的系統架構分析

為考量系統的穩定性與便利性，本研究選擇 ZOPE 為主要的網站建置系統，其中 ZOPE 已具有內容管理架構(CMF)的程式可供發展，因此本系統採用 ZOPE 的網站建置套件「PLONE」作為結構風工程知識管理平台的基本雛形，大部分的文件或檔案內容乃是建立於此雛形內，所使用的資料庫為 ZOPE 內建的物件導向資料庫，但在專案開發所使用的資料庫乃是選擇 MySQL 的資料庫進行資料儲存與查詢，如此可提升系統運作的速度。

在建立基本網站架構後，針對風工程研究中心的架構與系統需求進行系統修改，並且整合網路郵局（Open Webmail）的程式於系統內；利用 ZOPE 內建的 DTML 文件格式與方法，發展風工程數據分析程式流程管理模組，如此利用 PLONE 本身的成員群體功能，配合不同資料夾權限設定以及結合網路郵局、數據分析等功能，系統的內容即可大致完成，系統架構的程序流程如圖 6.2 所示。

6.4.3 整合型知識管理系統介紹

結構風工程知識管理系統乃是一整合型知識管理系統，其相關內容與功能項目如下所述。參考文獻（6-4）中有更詳細之說明。

6.4.3.1 個人與群體的設定

知識管理系統包括系統模組、個人工作模組及群體工作模組，茲分述如下：

（一）系統模組

本系統乃設定為風工程研究中心的知識入口網站，在此將研究中心分成「對內」與「對外」兩個部分，其中「對內」是指研究中心內部研究人員所使用的知識工作平台，「對外」則是公開化研究成果的介紹與專家系統之展示。其架構如

圖 6.3 所示。

（二）個人工作模組

在個人化的工作環境中，最主要的工作項目就是電子郵件的處理，以及檔案資料的儲存與轉移，另外，個人工作行事曆的安排與工作流程的規劃將可提高工作效率。本系統個人化的工作平台畫面如圖 6.4 所示。

（三）群體工作模組

風工程研究中心是一個多樣性的研究團隊，在此研究環境中，群體合作的溝通管道是一項重要的課題，除了平常電子郵件的傳遞外，文件、檔案的共享或訊息的發佈以及共同主題資訊的收集等等，也是常會出現的工作。本系統在群體合作的管道上所設定的溝通模式如圖 6.5 所示。

6.4.3.2 資料庫內容的規劃

本系統內的資料及設定都是採用「ZOEPE」的 ZODB 資料庫，所以並不用對其資料庫進行規劃，但在專案開發的部分，並不適用 ZODB 資料庫，故改採用 MySQL 資料庫進行資料收集與整理，圖 6.6 便是本研究對高層建築風洞試驗的整體資料庫關連圖，由此圖中可以瞭解資料表單間的相互關係。

本節將針對本研究在高層建築風洞試驗數據儲存的資料庫進行說明，介紹資料庫內各表單的內容，並列舉 MySQL 的資料庫範例進行展示，依序分成「模型參數模組」、「實驗參數模組」、「數據結果模組」與「檔案儲存模組」等四個部分進行討論，分別敘述其欄位的設定與資料的型態等等。

（一）模型參數模組

在模型部分，本研究將高層建築風洞試驗所有的實驗模型進行分類，依照斷面性質，分成「矩形(rectangle)」、「L 形(Lshape)」、「正多邊形(polygon)」、「曲面形狀(curved_shape)」與「不規則形(miscellaneous)」等五種；根據不同的模型分類給定不同的斷面描述參數，這些參數同時也是實驗進行所需考慮的變數。描述模型的參數有模型斷面長度(length)、斷面寬度(width)與模型高度(height)等基本描述參數，在「矩形系列(rectangle)」的模型中有進行斷面退縮(recess)與削角(coner_modification)的實驗，故矩形的模型參數較其他類型的模型參數為多；另外，由於將來有可能增加「不規則形系列」的風洞試驗，所以在此先建立「Miscellaneous」的表單，以利日後進行資料輸入的工作。

（二）實驗參數模組

在高層建築的風洞試驗中，需考慮許多實驗變因，如邊界層高度、流場係數、實驗溫度與實驗數據的採樣頻率等等，這些因素同時也是實驗數據分析時必須考慮的變數，所以本研究針對實驗變數建立資料表「test」，將每一次實驗進行時的環境設定詳細記錄，以供日後查詢使用。在實驗參數資料表中，記錄了實驗的環境變數、資料檔案名稱與模型的類別（model_type）與編號（model_id），實驗資料欄位的格式分為實數(decimal)、整數(int)與字元(varchar)三個部分，大部分的資料都是經由輸入介面存入資料庫內，僅實驗風速（wind_velocity）需要進行程式分析後始可得到。另外，未來風洞試驗可能進行遮蔽效應影響之探討，故在實驗資料表中增設「shelding_id」的欄位，與遮蔽模型的資料表單(shelding)相連結，遮蔽模型表單中建立模型的斷面長度(length)、寬度(width)與高度(height)，以及遮蔽的距離(distance)與角度(angle)等等。

（三）數據結果模組

在數據分析時，可獲得許多有關結構風工程的資訊，其中最重要的部分即是風力係數與風力頻譜兩項資訊，風力係數可直接建立於資料表中，但由於風力頻譜的資料點過多，只能以檔案的形式進行儲存，所以在資料庫中便儲存其檔名與存放的位址。首先，建立數據分析程式的資料表(analysis)，內容記錄高層建築研究室現有的分析程式，分別是「風力係數與原始風力頻譜」與「風力係數與修正風力頻譜」兩種程式，所以每一次實驗結果皆可進行兩次的程式分析，所以另外建立區別分析程式的資料庫表單(use_analysis)，以記錄實驗結果採用的分析程式編號(analysis_id)。在風力係數(coefficient)與風力頻譜(spectrum)的資料表中，分別有數據結果檔案編號(file_id)與使用分析程式編號(use_analysis_id)，紀錄著不同的分析程式所得到的結果；風力頻譜資料表中包含兩個實驗資料擷取頻道(channel)的編號，雖然目前所採用的程式僅可分析同一頻道的「自相關頻譜圖形」，但是日後可能進行不同頻道間的「交相關頻譜圖形」分析，所以在此建立「first_channel」與「second_channel」兩個欄位以進行頻譜資訊的儲存。

（四）檔案儲存模組

本系統數據分析專案內的檔案皆儲存於伺服器上，且檔案系統獨立於 ZOPE 之外，並未包含於 ZODB 資料庫內，可方便日後進行原始資料的備份與取得；在檔案資料分類中，將數據分析的檔案分成圖形檔案與資料檔案，分別採用不同的資料表與資料夾進行儲存，其欄位紀錄著檔案名稱、路徑與更新日期，在圖形資料表單內增加記錄模型的欄位資料，模型類別（model_type）與模型編號

(model_id) 等。

6.4.3.3 高層建築風洞實驗分析

本系統在專案開發的部分乃是與高層建築研究團隊合作，利用網路的方便性，使高層研究組的研究成員可利用本系統進行數據分析，並可查詢、檢視各風洞試驗模型的風力係數與風力頻譜資料。其數據分析的架構如圖 6.7 所示。

本節就高層建築風洞試驗的數據分析流程進行功能展示，作為系統專案驗證與介面操作之說明。在輸入帳號、密碼之後，點選上方的「數據分析」標籤或點選左方的「數據分析」資料夾圖示即可進入數據分析的功能畫面。

系統的流程運行是以模型類別進行分類，每一個階段先進行資料查詢的動作，然後使用者可根據查詢的結果進行資料修改、新增或刪除的動作，使用者完成查詢的工作後，即可進入下一個階段的工作，以下就各個階段進行說明。

(一) 模型參數輸入與修改階段

數據分析首先需選擇模型的斷面類型，然後輸入欲查詢的參數內容進行查詢，在模型的查詢結果中可進行模型參數的修改或新增模型，如圖 6.8 所示。另外，在模型的描述中有模型圖片的參數說明，按下「編修圖形」的按鈕可進行模型圖片的新增上傳、修改與刪除的動作，如圖 6.9 所示。

(二) 實驗參數輸入與修改階段

在查詢模型資料完畢後可進行實驗資料的查詢，按下「查詢實驗」的按鈕後即可查詢該模型所進行的風洞試驗資料，其圖形如圖 6.10 所示。使用者可接著進行實驗資料的新增、修改或刪除，按下「修改資料」可進入實驗資料修改的畫面，如圖 6.10 所示，按下「新增實驗」可進入實驗資料新增的畫面。

(三) 執行程式分析階段

在實驗查詢完畢時，使用者按下任一筆資料後方的「實驗分析」按鈕可進入資料分析的畫面，如圖 6.11 所示，在此畫面中將列出使用者先前所查詢的模型類別與實驗資料，然後使用者選擇與採用的分析程式，再按下「程式分析」的按鈕後可進行下一步驟，如圖 6.12 所示，使用者按下「風力係數」、「風力頻譜」、「執行程式」等三個按鈕可接著進行風力係數查詢、風力頻譜圖繪製與執行程式分析等工作，其中「執行程式」將在伺服器端執行數據分析程式，然後會將執行結果直接儲存於資料庫內。

(四) 查詢風力係數與繪製風力頻譜圖階段

使用者一旦執行過「執行程式」的分析運算動作後，系統會將執行結果自動儲存於資料庫中，爾後，使用者可不需再進行「執行程式」的動作，便可直接查詢該筆風力係數或繪製風力頻譜圖形。當使用者對於所查詢出的風力係數或風力頻譜結果有所疑慮之時，使用者亦可重新進行「執行程式」的動作，重新運算一次實驗分析資料。當使用者按下「風力係數」的按鈕後，系統會查詢資料庫內的資料，並顯示於畫面上，如圖 6.13 所示，若資料庫內尚未建立該筆資料，系統會提供使用者「執行程式」的選項進行程式運算分析，如圖 6.14 所示。當使用者按下「風力頻譜」的按鈕後，使用必須先選擇風力頻譜的方向，如圖 6.15 所示，接著系統將會繪製該筆實驗資料所進行程式分析後的結果圖形，如圖 6.16 所示。

6-5 結論展望與成果自評

富蘭克林曾經說過：「知識是最高報酬的投資。」但是這項投資必須透過行動，才能彰顯出所謂的高報酬率，否則知識還是知識。知識經濟的優勢在於學習，學習的效能在於行動，行動的價值在於思維，所以任何企業或組織的知識必須建立在未來的發展基礎上，才能成為實質的競爭優勢。

本研究如計畫書中之規劃已達成預期目標，應用網際網路的技術，將知識管理的部分理論模式套用於淡江大學風工程研究中心，藉由本研究所建構出的「結構風工程知識管理平台」系統，可將風工程研究人員的顯性與隱性知識進行儲存與整合，及建立網路化工作平台，以達成個人化數位辦公室的目標。在群體合作的狀態模式下，藉由本系統所建立的各項溝通連結管道，可讓風工程研究中心內的成員進行訊息的傳送與資料的傳遞，如此，可有效的提升研究中心內的運作效率。

本研究之各項特點與貢獻，在於經由「結構風工程知識管理平台」可將風工程研究中心內每個成員的知識進行整合，讓風工程的研究結果具有整體性，提供未來在進行風工程研究工作時一個完整的知識庫。本系統整合網路郵局的各項功能，使用者可透過本系統進行電子郵件處理、行事曆安排與檔案資料傳遞等工作利用網路的功能即可不受時空的限制進行日常的工作。新世紀的工作型態不再是一人獨自完成一件工作的型態，群體化的團隊合作形式將是無可避免的趨勢。在系統群體溝通的管道下，群組內的成員可及時的獲取訊息與資源，達到增加工作

效率的目的。本系統建置網路化的工作平台提供專業性的資料計算與查詢功能，讓研究高層建築風工程的人員可即時得到相關的風力係數與風力頻譜資料。

本系統主要所探討研究的乃是在「風工程研究中心」內建立知識管理模式的架構，所以本系統目前所呈現的部分僅有系統功能與系統輪廓（framework）等部分，至於「知識庫」的內容，需要研究中心內的成員輸入大量的資料後才可建立一個完整的知識庫。在本系統完成後，必須先對研究中心的成員進行人員訓練，讓每一位成員都瞭解系統使用的方法；在使用系統之時，我們也必須檢視自身研究工作的流程，改變傳統的工作方式，讓此系統成為我們研究工作的一部分，如此才可有效提昇工作效率。

本研究所建立的知識管理系統包括文獻中所述部分的知識活動管理工具與機制，例如：知識搜尋、知識應用與知識儲存等等。但是在知識移轉與知識創造的知識活動中，本系統並未建立相關的管理工具，日後在擴充本系統功能時，可將此兩部分的知識活動內容新增至本系統中，使知識管理系統的內涵更加完整。

6-6 參考文獻

- 6-1. Wang, Jenmu, "The Course, Power and Possibilities of Knowledge Management for Civil Engineering," Cross-Strait Symposium on IT in Civil Engineering, Jiao Tong University (2001).
- 6-2. 萊斯特 梭羅，齊思賢，「知識經濟時代」，時報出版（2000）。
- 6-3. 勤業管理顧問公司(Arthur Andersen Business Consulting)著，劉京偉譯，「知識管理的第一本書」，商周出版（2000）。
- 6-4. 謝明芳，「結構風工程知識管理平台架構之探討與建置」，碩士論文，私立淡江大學土木工程研究所，台北，2003。

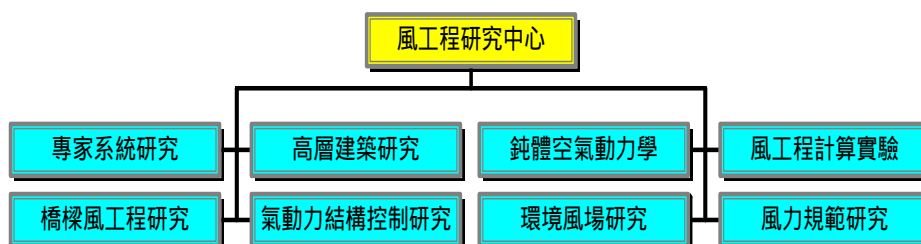


圖 6.1：研究中心整體架構圖

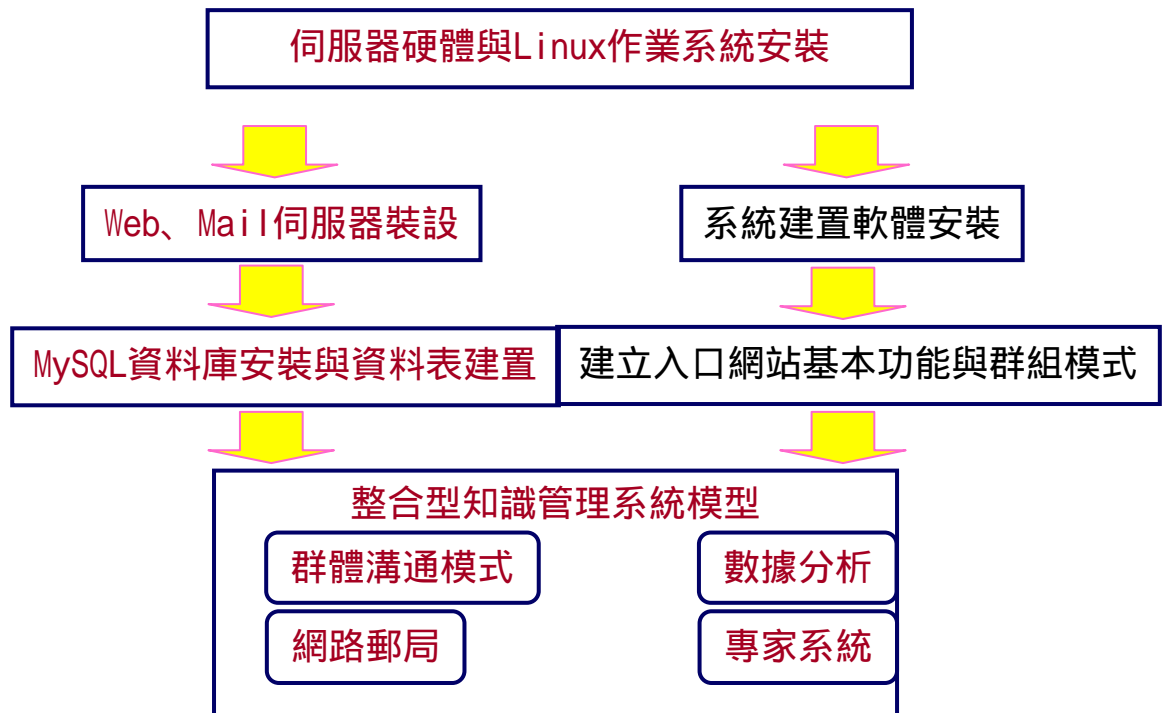


圖 6.2：系統架構流程圖

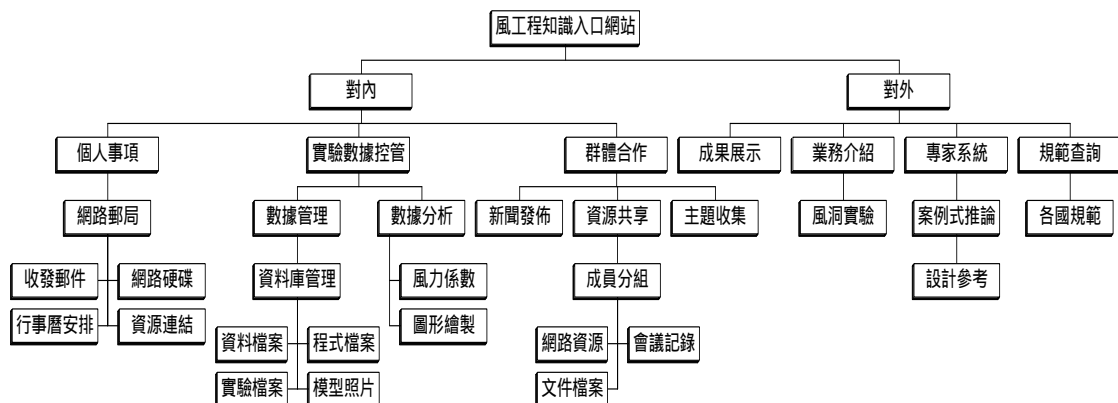


圖 6.3：系統工作平台架構圖



圖 6.4：個人化工作平台畫面圖



圖 6.5：群體合作溝通管道模式圖

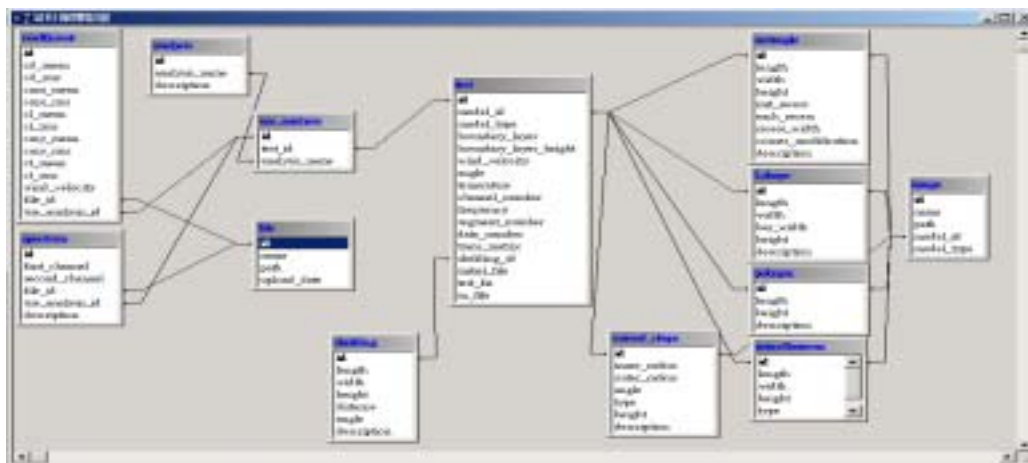


圖 6.6：高層建築風洞試驗的整體資料庫關連圖

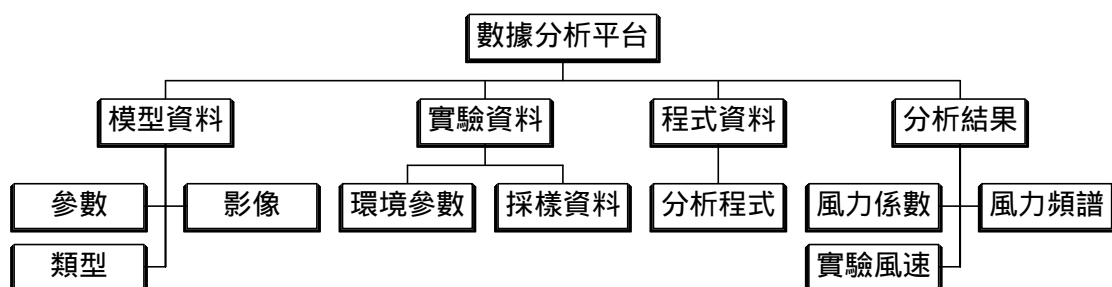


圖 6.7：數據分析平台之架構圖

矩形模型查詢結果

下列是根據您輸入的數據所找到模型資料。您可以分別對每一筆模型資料進行數據修改、刪除模型資料。您也可以接著查詢此模型所進行的實驗，或是新增新的模型資料。

查詢結果

ID	長度(m)	寬度(m)	高度(m)	起使退縮高度(m)	每段退縮高度(m)	每段退縮寬度(m)	縮角比	備註	選項
12	0.1	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0		修改 刪除 查詢實驗 編輯圖形

圖片

[圖數據分析](#)
[重新查詢](#)
[新增模型](#)

修改資料

編修圖形

新增模型

圖 6.8：模型參數查詢結果畫面

新增或刪除矩形模型圖片

您可以在此新增或刪除模型圖形。

編輯圖片

ID	長度(m)	寬度(m)	高度(m)	起使退縮高度(m)	每段退縮高度(m)	每段退縮寬度(m)	縮角比	備註
12	0.1	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	

圖片

[修改](#)
[編輯資料](#)

檔名 刪除 ☐ yes ☒ no
 路徑 rec-4-1 [瀏覽...](#)

檔名 刪除 ☐ yes ☒ no
 路徑 rec-4-2 [瀏覽...](#)

檔名 刪除 ☐ yes ☒ no
 路徑 rec-4-3 [瀏覽...](#)

[圖數據分析](#)

NEW 檔名 路徑 [瀏覽...](#)

[新增圖片](#)

修改圖片

新增圖片

回查詢畫面

圖 6.9：模型圖片編修功能畫面

實驗查詢結果

根據你所選擇的模型，有下列實驗資料。你可以修改或刪除資料；也可以由最後一列新增一筆實驗資料。

查詢結果

ID	模型類型	找場係數	牆厚高度	風速	風向角	頻度	採樣率	風速數	資料點數	轉換矩陣	縮角ID	初始檔	實驗檔	輸入檔	選項	
15	Rectangle	0.32	250.0	0.0	0.0	26.0	6	500	15	4096	INVB	0	43tds	sdfv	f2202.IN	修改資料 資料分析

[圖數據分析](#)
[重新查詢](#)
[新增實驗](#)

[修改實驗資料](#)

[新增實驗資料](#)

[進行程式分析](#)

圖 6.10：實驗資料查詢畫面

高層建築風工程資料分析

請先選擇分析方式，然後可以進行程式分析或直接進入管理程式的模式。



圖 6.11：實驗分析程式選擇畫面

程式分析

你可以直接查詢風力係數或繪製風力頻譜圖。
也可以先執行分析程式再檢視風力係數與風力頻譜。

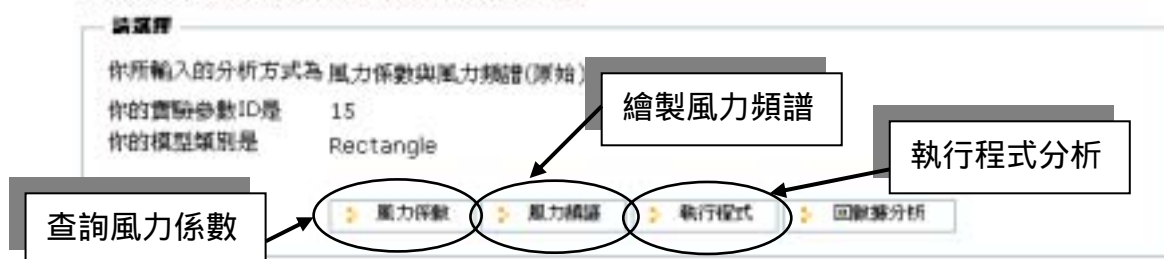


圖 6.12：實驗分析結果選擇畫面

風力係數查詢

根據你所選擇的模型與實驗參數，相關的風力係數如下。

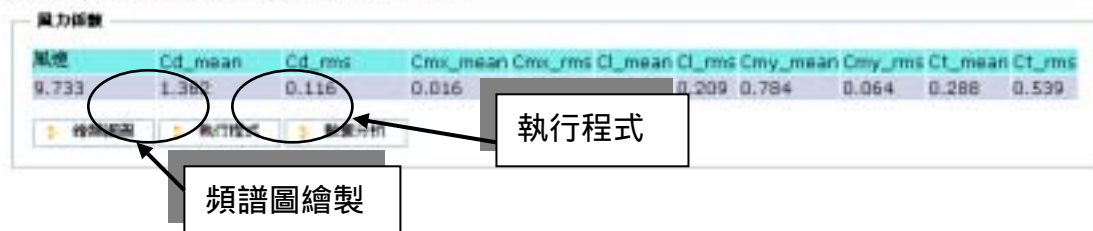


圖 6.13：風力係數查詢結果

進行程式分析

此實驗尚未進行程式分析，故資料庫中沒有該筆風力係數與頻譜資料。

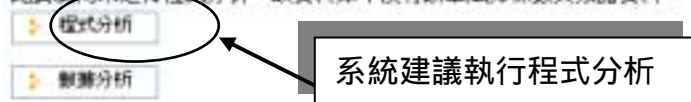


圖 6.14：尚未進行程式分析查詢結果畫面

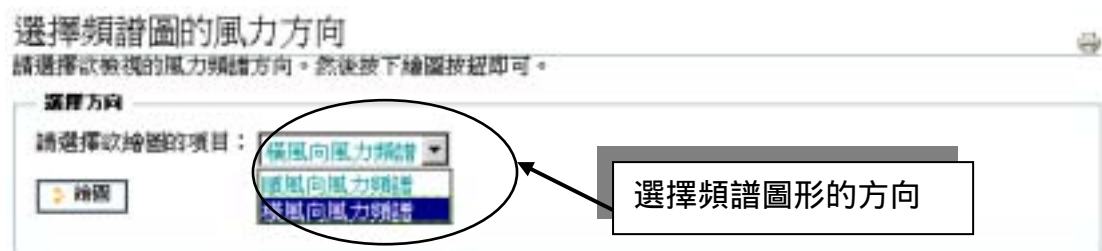


圖 6.15：選擇風力頻譜方向畫面

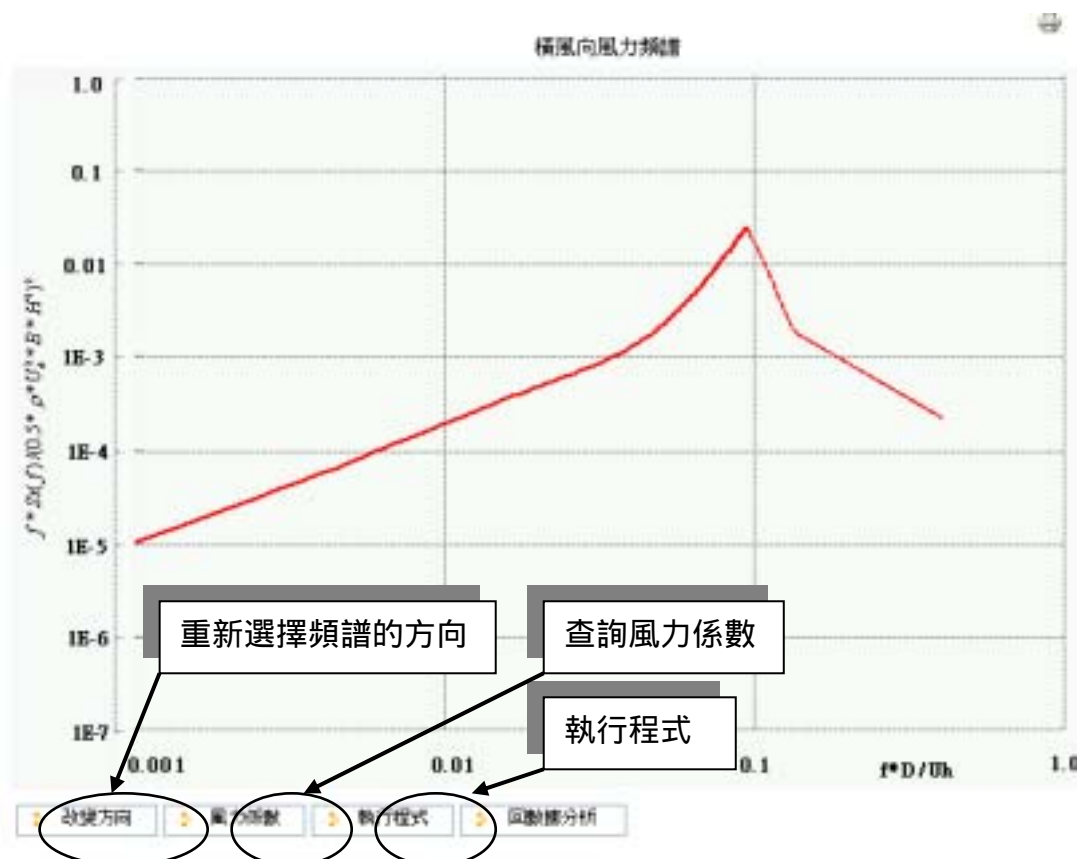


圖 6.16：風力頻譜圖形繪製結果

第七章 橋樑抗風減振之消能裝置校正基準

平台之架構建立

7-1 計畫概述

我國近年來經濟高度成長，加快公共建設如高速公路或快速道路等的興建步伐。其中，橋樑常扮演交通運輸上的樞紐，在自然災害如震災風災等的侵襲威脅下，橋樑結構之安全與否，直接間接地對附近地區經濟造成衝擊。我國近年來亦逐漸出現跨度較長的纜索支撐橋樑，隨著橋樑跨度的增長，增加了橋樑柔軟度，將使得這些纜索支撐橋樑受風力影響的振動行為愈來愈顯著，振動機制的複雜程度已超越昔日工程界對於處理一般短跨橋樑的認知，如何避免或減少風力引致的振動，以提高它們的安全可靠度，乃是學界工程界的一項新的挑戰。

本計畫提出建立橋樑抗風減振應用之消能裝置元件之性能測試架構系統，做為校正基準平台，建構一套校正元件性能之可靠實驗流程，以理論配合實驗的方式，有系統地探討消能裝置之元件性能。本計畫依工作內容預計在二年期間完成，第一年工作重點為(i)架構一垂直與轉動向之震動裝置，並在其上設計二自由度之振動模型模擬橋面板結構作為校正基準平台；(ii)藉強制振動方式以系統識別法得到二自由度振動模型之力量與反應之間的相關轉換函數。第二年工作重點為(i)建立扭轉向調頻液柱阻尼器（Tuned Liquid Column Damper, TLCD）於單自由度結構之運動方程式，並根據理論式推導以最佳化方式，訂定應用TLCD於單自由度結構之最佳參數（頻率、水頭損失係數）之設計表；(ii)設計及建構扭轉向TLCD消能裝置模型，並進行元件性能測試，率定TLCD頻率與水頭損失係數，和理論式進行比較。

第一年與第二年之進度已如預期完成。第一年分儀器採購、實驗裝置之架設及橋面板結構之系統識別三方面分別敘述。儀器採購方面共有頻譜分析儀、資料擷取卡及加速度計之購置；實驗裝置之架設包括二軸振動平台之組裝及模擬橋面板結構之兩個自由度振動模型之實驗架設；而橋面板結構之系統識別包括質量率定、轉動慣量率定、垂直向頻率反應函數之系統識別及轉動向頻率反應函數之系統識別。第二年分扭轉向TLCD最佳參數設計表、TLCD模型建構及元件性能測試三方面分別敘述。分述如下：

7-2 第一年完成項目

I. 儀器採購：

(A) 頻譜分析儀(Spectrum Analyzer)

廠牌為 OROS，型號為 OROS，附配筆記型電腦一台搭配軟體使用，其外觀如圖 7.1 所示。



圖 7.1：OROS 頻譜分析儀

其硬體簡略規格如下：八個類比輸入通道，最大範圍 $\pm 60V$ ，解析度 16 bits，最大採樣頻率 51.2 kHz。二個類比輸出通道，內建輸出波形包含 Sine、Swept Sine、Random、Chirp 等，解析度為 18 bits，另外使用者可自行定義波形，解析度則為 16 bits。一個外部觸發通道，最大範圍 $\pm 20V$ 。搭配其相關軟體使用，頻譜分析儀具四類功能：(一)即時量測與記錄 (Real Time Recording)；(二)即時快速富利葉轉換與轉換函數之運算 (Real Time FFT & Transfer Function)；(三)離線快速富利葉轉換與轉換函數之運算 (Off-Line FFT & Transfer Function)；(四)可當波形產生器 (Function Generator) 使用。

(B) 資料擷取卡(Acquisition Card)：

廠牌 National Instrument(NI)，型號 NI 6036E 之多功能擷取卡兩片，每片具 16 通道 16-bit 類比輸入及兩通道 16-bit 類比輸出，採樣頻率最快可達 200 k/sec，供作實驗量測之用。

(C) 加速度計(Accelerometer)：

廠牌 PCB，型號 352C65 之加速度計共 10 個，其靈敏度為 100mv/g，頻率範圍 0.3 Hz~12 kHz，供作實驗量測之用。

II. 實驗裝置之架設：

(A) 二軸振動平台(2-Axis Shake Table)之組裝：

二軸振動平台為一具垂直與轉動向之雙軸振動裝置，每一軸由兩個同步電動馬達驅動，其中轉動軸由馬達直接驅動，垂直軸則透過導螺桿驅動，如圖 7.2、7.3 所示。此振動裝置追蹤命令訊號之能力可達頻率 10 Hz 左右。另外，為考慮未來可能配合其他風洞實驗搬動之便利性，設計時盡量將其模組化，必要時可將各模組拆卸再重新組裝。二軸振動平台之功用為測試消能裝置之元件性能。



圖 7.2：二軸振動平台上視照片



圖 7.3：二軸振動平台平視照片

(B) 模擬橋面版結構之兩個自由度振動模型之實驗架設：

在二軸振動平台上建構一兩個自由度(垂直向及轉動向)模型模擬橋面版結構，並架設相關量測設備，如圖 7.4 所示。圖 7.5 所示為橋面版模型之機構示意圖。

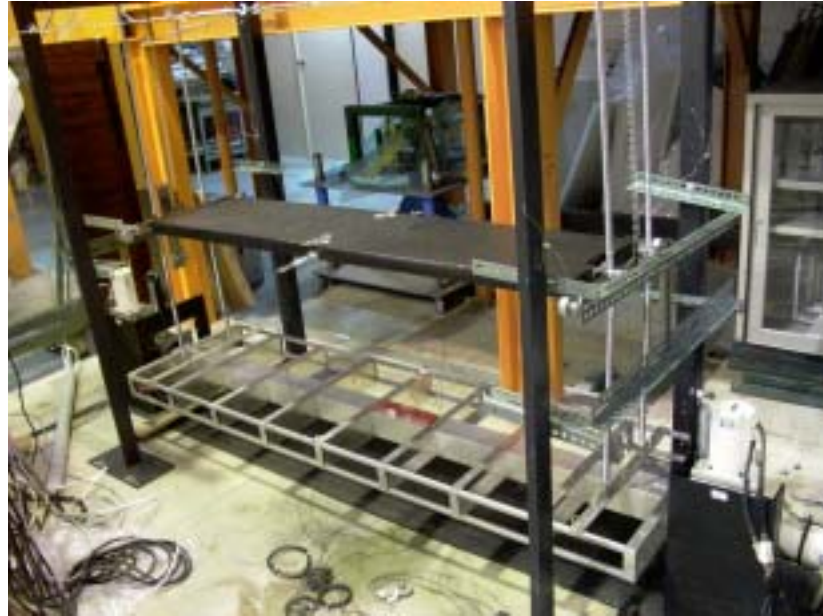


圖 7.4：兩個自由度之橋面版振動模型照片

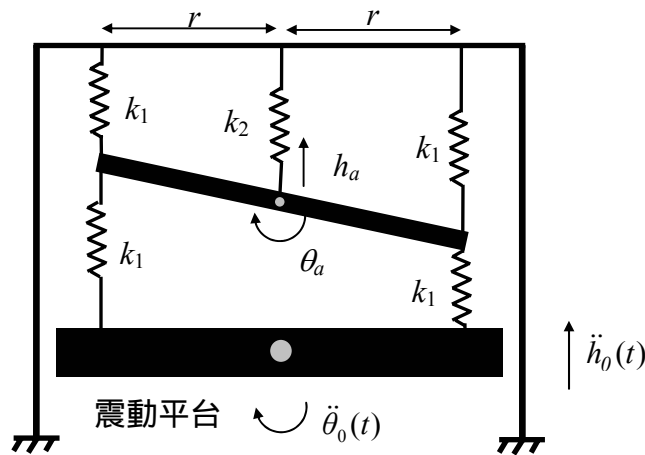


圖 7.5：橋面版模型之機構示意圖

根據圖 7.5 所示，可導得橋面版受振動平台之擾動後其垂直向之運動方程式為

$$m \ddot{h}_a + (c_2 + 2c_1) \dot{h}_a + 2c_1(\dot{h}_a - \dot{h}_0) + (k_2 + 2k_1) h_a + 2k_1(h_a - h_0) = 0 \quad (7-1)$$

其中 h_a 為橋面版之垂直向絕對位移， h_0 為振動平台之垂直向絕對位移。式

(7-1)可改寫成以 h_a 為未知數之方程式，亦即

$$m \ddot{h}_a + (c_2 + 4c_1) \dot{h}_a + (k_2 + 4k_1) h_a = 2c_1 \dot{h}_0 + 2k_1 h_0 \quad (7-2)$$

則由 \ddot{h}_0 引起之 \ddot{h}_a 之頻率反應函數 (Frequency Response Function) $T_{\ddot{h}_a/\ddot{h}_0}$ 為

$$T_{\ddot{h}_a/\ddot{h}_0} = \frac{\frac{1}{m} (2c_1(i\omega) + 2k_1)}{(i\omega)^2 + 2\zeta_h \omega_h(i\omega) + \omega_h^2} \quad (7-3)$$

其中 $\omega_h = \left(\frac{k_h}{m}\right)^{1/2}$; $k_h = k_2 + 4k_1$; $\zeta_h = \frac{c_h}{2m\omega_h}$; $c_h = c_2 + 4c_1$ 。亦可得 \ddot{h}_0 引起

之相對加速度 \ddot{h} ($h = h_a - h_0$) 之頻率反應函數

$$T_{\ddot{h}/\ddot{h}_0} = T_{\ddot{h}_a/\ddot{h}_0} - 1 = \frac{- (i\omega)^2 - \frac{c_2 + 2c_1}{m} (i\omega) - \frac{k_2 + 2k_1}{m}}{(i\omega)^2 + 2\zeta_h \omega_h(i\omega) + \omega_h^2} \quad (7-4)$$

另外，橋面版受振動平台擾動之轉動向運動方程式可表示為

$$J \ddot{\theta}_a + 2c_1 r^2 \dot{\theta}_a + 2c_1 r^2 (\dot{\theta}_a - \dot{\theta}_0) + 2k_1 r^2 \theta_a + 2k_1 r^2 (\theta_a - \theta_0) = 0 \quad (7-5)$$

其中 θ_a 為橋面版之轉動向絕對轉角， θ_0 為橋振動平台之轉動向絕對轉角。

或改寫成

$$J \ddot{\theta}_a + 4c_1 r^2 \dot{\theta}_a + 4k_1 r^2 \theta_a = 2c_1 r^2 \dot{\theta}_0 + 2k_1 r^2 \theta_0 \quad (7-6)$$

則由 $\ddot{\theta}_0$ 引起之 $\ddot{\theta}_a$ 之頻率反應函數 $T_{\ddot{\theta}_a/\ddot{\theta}_0}$ 為

$$T_{\ddot{\theta}_a/\ddot{\theta}_0} = \frac{\frac{r^2}{J} (2c_1(i\omega) + 2k_1)}{(i\omega)^2 + 2\zeta_\theta \omega_\theta(i\omega) + \omega_\theta^2} \quad (7-7)$$

其中 $\omega_\theta = \left(\frac{k_\theta}{J}\right)^{1/2}$; $k_\theta = 4k_1 r^2$; $\zeta_\theta = \frac{c_\theta}{2m\omega_\theta}$; $c_\theta = 4c_1 r^2$ 。亦可得 $\ddot{\theta}_0$ 引起之相

對加速度 $\ddot{\theta}$ ($\theta = \theta_a - \theta_0$) 之頻率反應函數

$$T_{\ddot{\theta}/\ddot{\theta}_0} = T_{\ddot{\theta}_a/\ddot{\theta}_0} - 1 = \frac{- (i\omega)^2 - \frac{r^2}{J} (2c_1(i\omega) + 2k_1)}{(i\omega)^2 + 2\zeta_\theta \omega_\theta(i\omega) + \omega_\theta^2} \quad (7-8)$$

理論式 (7-4) 及式 (7-8) 中之各參數 m 、 ω_h 、 ζ_h 、 J 、 ω_θ 、 ζ_θ 將在下節

之系統識別中與實驗結果比較而求出。

III. 橋面版結構之系統識別：

(A) 垂直自由度質量率定：根據單自由度結構動力學 $k_h = m \omega_h^2$ ， k_h 、 m 、 ω_h 分別為結構之勁度、質量及自然頻率。將額外質量依序加於原結構，因結構勁度不變，總共質量與自然頻率之關係可寫為

$$\frac{1}{\omega_h^2} = \frac{1}{k_h} (m + \Delta m) \quad (7-9)$$

因此，以 $\frac{1}{\omega_h^2}$ 為縱軸， Δm 為橫軸，斜率與縱軸截距即分別代表 $\frac{1}{k_h}$ 與 $\frac{m}{k_h}$ 。

將縱軸截距除以斜率可得質量 m 。質量率定曲線如圖六所示，所得質量 m 為 5.2 kg

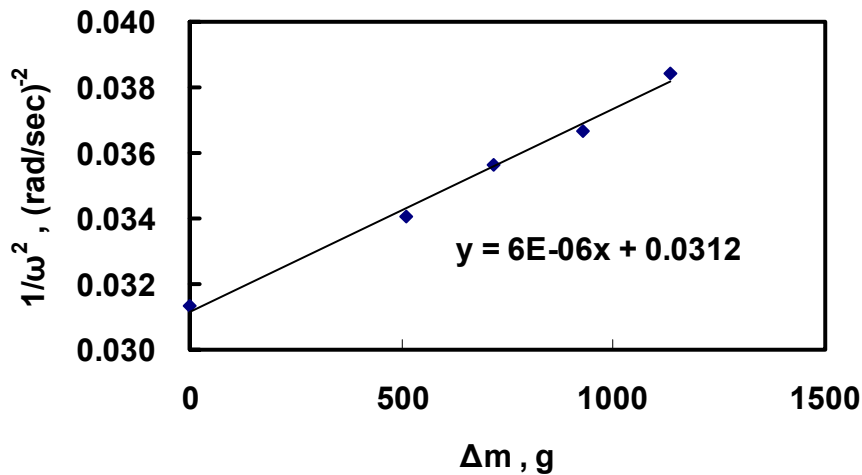


圖 7.6：質量率定曲線

(B) 轉動自由度轉動慣量率定：

如前述之質量率定，以 $\frac{1}{\omega_\theta^2}$ 為縱軸， ΔJ 為橫軸，斜率與縱軸截距即分別代表 $\frac{1}{k_\theta}$ 與 $\frac{J}{k_\theta}$ 。將縱軸截距除以斜率可得轉動慣量 J 。轉動慣量率定曲線如圖 7.7 所示，所得轉動慣量 J 為 0.079 kg-m²。

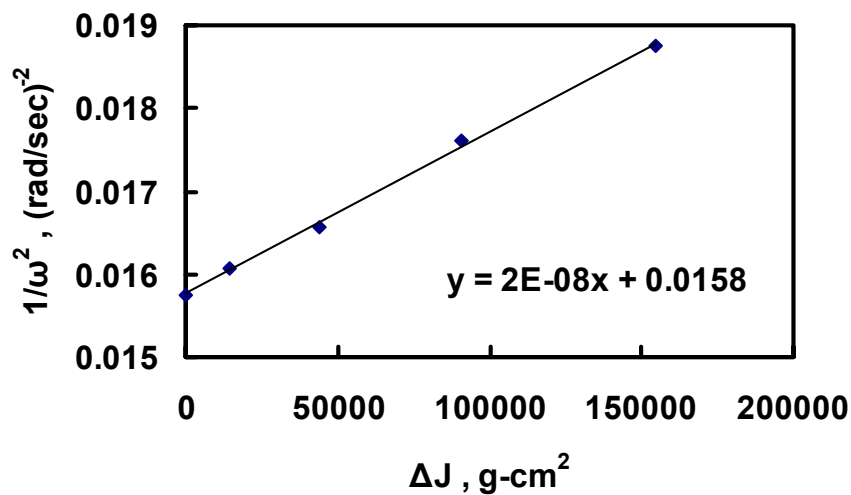


圖 7.7：轉動慣

量率定曲線

(C) 垂直向頻率反應函數 (Frequency Response Function) :

輸入白訊命令驅動振動台垂直向馬達，量測振動台垂直向絕對加速度及橋面版垂直向相對加速度反應，得兩者頻率域之頻率反應函數 $T_{\ddot{h}/\ddot{h}_0}$ 如圖 7.8 虛線所示，經曲線擬合後之曲線如圖 7.8 實線所示。

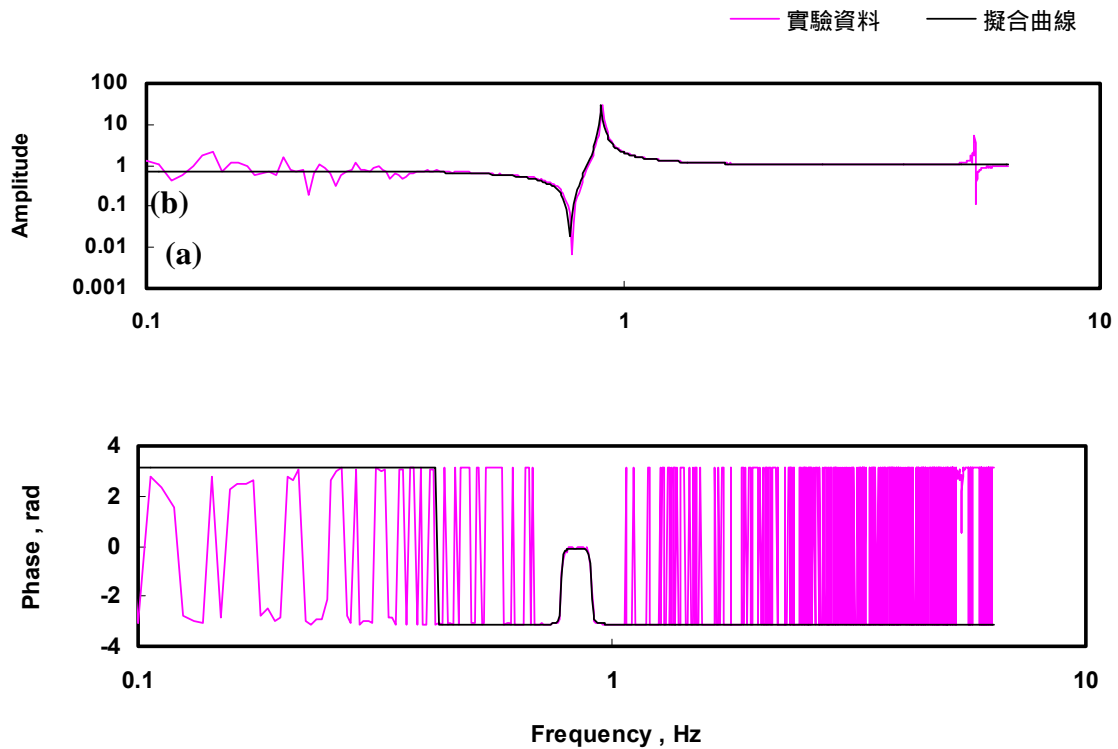


圖 7.8：橋面版垂直向相對加速度與振動台垂直向絕對加速度之頻率反應函數：

(a)振幅；(b)相角

曲線擬合之結果為 $T_{\ddot{h}/\ddot{h}_0} = \frac{-(i\omega)^2 - 0.02813(i\omega) - 23.798}{(i\omega)^2 + 0.04169(i\omega) + 31.837}$ ，與式(4)比較可得阻

尼比 $\zeta_h = 0.37\%$ 自然頻率 $\omega_h = 0.898 \text{ Hz}$

(D) 轉動向頻率反應函數 (Frequency Response Function)：

輸入白訊命令驅動振動台轉動向馬達，量測振動台轉動向絕對角加速度及橋面版轉動向相對角加速度反應，得兩者頻率域之頻率反應函數 $T_{\ddot{h}/\ddot{h}_0}$ 如圖 7.9 虛線所示，經曲線擬合後之曲線如圖 7.9 實線所示。

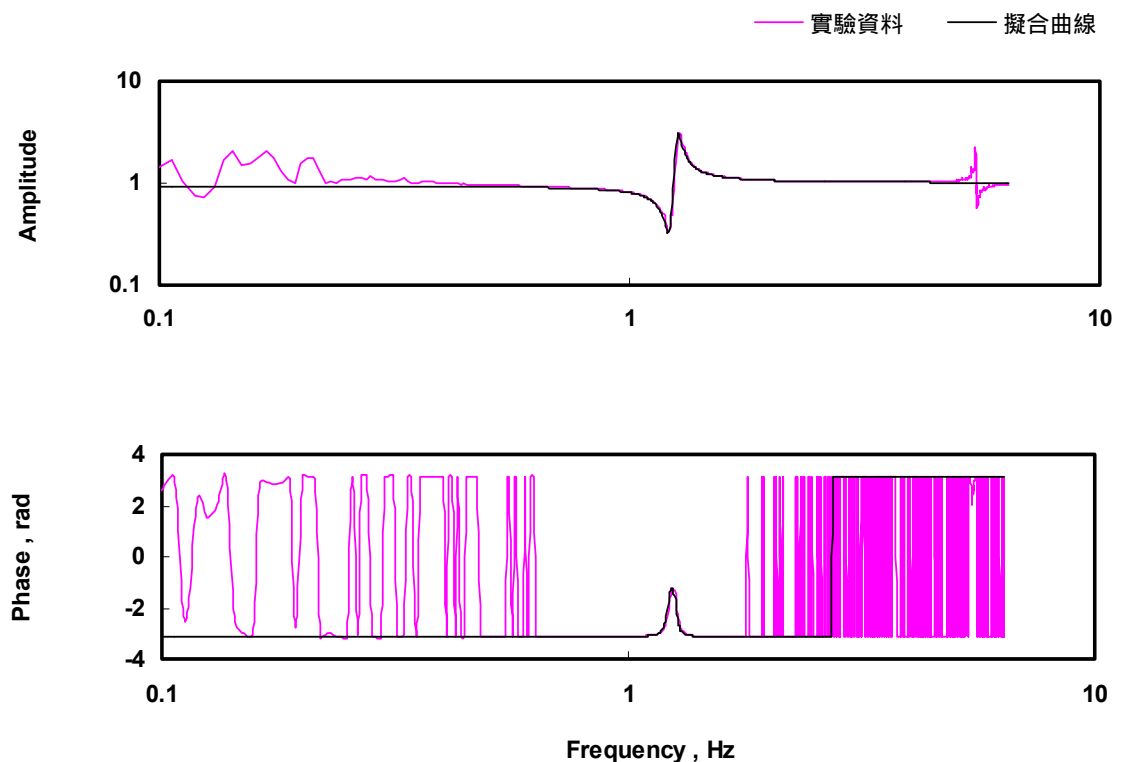


圖 7.9：橋面版轉動向相對角加速度與振動台轉動向絕對角加速度之頻率反應函數：(a)振幅；(b)相角

曲線擬合之結果為 $T_{\ddot{\theta}/\ddot{\theta}_0} = \frac{-(i\omega)^2 - 0.2323(i\omega) - 59.030}{(i\omega)^2 + 0.2246(i\omega) + 63.136}$ ，與式(4)比較可得阻

尼比 $\xi_\theta = 1.41\%$ 自然頻率 $\omega_\theta = 1.265 \text{ Hz}$ 。

7-3 第二年完成項目

I. 扭轉向 TLCD 最佳參數設計表

(A) 運動方程式之推導

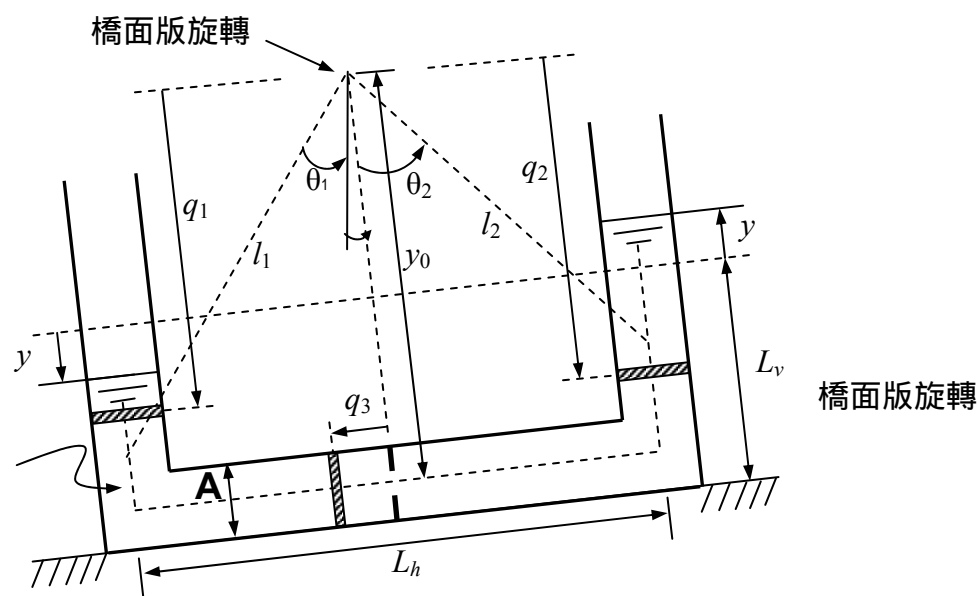


圖 7.10：扭轉向 TLCD 運動方程式推導示意圖

圖 7.10 所示為扭轉向 TLCD 置於單自由度橋面版之示意圖。TLCD 阻尼器之概念乃是利用 U 型管柱液面之振盪吸收振動動能，並藉調整管流截孔之大小改變水頭損失（阻尼）以消散能量。當液面振盪時，假設(i)管內液體不可壓縮(ii)兩垂直管中心距遠大於管徑尺寸(iii) 管內液體流動不產生波浪。

若橋面版之扭轉角度為 α 、TLCD 液面運動之位移為 y ， ρ 為管內液體密度； A 為 U 型管截面積； y_0 為水平管中心距橋面版旋轉中心距離； L_h 為兩垂直管中心距離（水平液柱長度）； L_v 為 TLCD 靜止時之垂直液柱長度； k_α 為結構勁度； g 為重力加速度。其運動過程中之動能可表示為：

$$T = T_{Left\ Vertical\ Liquid} + T_{Right\ Vertical\ Liquid} + T_{Horizontal\ Liquid} + T_{Bridge\ Deck} \quad (7-10)$$

其中

$$T_{Left\ Vertical\ Liquid} = \frac{1}{2}\rho(L_v - y)A(\dot{y} + \frac{L_h}{2}\dot{\alpha})^2 + \frac{1}{2}\rho A \int_{y_0 - L_v + y}^{y_0} (q_1\dot{\alpha})^2 dq_1$$

$$T_{Right\ Vertical\ Liquid} = \frac{1}{2}\rho(L_v + y)A(\dot{y} + \frac{L_h}{2}\dot{\alpha})^2 + \frac{1}{2}\rho A \int_{y_0 - L_v - y}^{y_0} (q_2\dot{\alpha})^2 dq_2 \quad (7-11)$$

$$T_{Horizontal\ Liquid} = \frac{1}{2}\rho L_h A(\dot{y} + y_0\dot{\alpha})^2 + \frac{1}{2}\rho A \int_{-L_h/2}^{L_h/2} (q_3\dot{\alpha})^2 dq_3 + \frac{1}{2}J_\alpha \dot{\alpha}^2$$

$$T_{Bridge\ Deck} = \frac{1}{2}J_\alpha \dot{\alpha}^2 ; \text{ 其中 } J_\alpha \text{ 為橋面版質量慣性矩}$$

經整理得

$$T = \rho L_v A(\dot{y} + \frac{L_h}{2}\dot{\alpha})^2 + \frac{1}{3}\rho A \dot{\alpha}^2 [3y_0^2 L_v - 3y_0 L_v^2 + L_v^3 - 3(y_0 - L_v)y^2]$$

$$+ \frac{1}{2}\rho L_h A(\dot{y} + y_0\dot{\alpha})^2 + \frac{1}{3}\rho A \dot{\alpha}^2 (\frac{L_h}{2})^3 + \frac{1}{2}J_\alpha \dot{\alpha}^2 \quad (7-12)$$

另外，位能可表示為

$$V = V_{Left\ Vertical\ Liquid} + V_{Right\ Vertical\ Liquid} + V_{Horizontal\ Liquid} + V_{Bridge\ Deck} \quad (7-13)$$

其中

$$V_{Left\ Vertical\ Liquid} = -\rho g A(L_v - y) l_1 \cos(\theta_1 - \alpha)$$

$$V_{Right\ Vertical\ Liquid} = -\rho g A(L_v + y) l_2 \cos(\theta_2 + \alpha) \quad (7-14)$$

$$V_{Horizontal\ Liquid} = \rho A L_h g(-y_0 \cos\alpha)$$

$$V_{Bridge\ Deck} = \frac{1}{2}k_\alpha \alpha^2$$

利用以下幾何關係

$$l_1 \cos\theta_1 = y_0 - (L_v - y)/2$$

$$l_1 \sin\theta_1 = L_h/2$$

$$l_2 \cos\theta_2 = y_0 - (L_v + y)/2$$

$$l_2 \sin\theta_2 = L_h/2$$

經整理得

$$V = -\rho g A L y_0 \cos \alpha + \rho g A L_h y \sin \alpha + \rho g A [L_v^2 + y^2] \cos \alpha + \frac{1}{2} k_\alpha \alpha^2 \quad (7-15)$$

其中 $L = L_h + 2L_v$ 為液柱總長。

非保守力部分可表示為

$$\alpha \text{ 向: } Q_{nc, \alpha} = -c_\alpha \dot{\alpha} + M \quad (7-16)$$

$$y \text{ 向: } Q_{nc, y} = -\frac{\eta}{2} \rho A \dot{y} |\dot{y}| \quad (7-17)$$

其中 c_α 為橋面版之阻尼係數； M 為橋面版所受外力轉矩； η 為水頭損失係數，與管流截孔的大小有關係。

將式(7-12)、(7-15)、(7-16)、(7-17)代入 Lagrange's Equation

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = Q_{nc, \alpha} \quad \text{其中 } L = T - V$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial L}{\partial y} = Q_{nc, y}$$

在橋面版小變位（ α 很小）之假設下，經整理並忽略高次非線性項，可得橋面版及 TLCD 互制之運動方程式

$$(J_\alpha + J_d) \ddot{\alpha} + c_\alpha \dot{\alpha} + k_\alpha \alpha + \rho A L_h (L_v + y_0) \ddot{y} + \rho g A L y_0 \alpha + \rho g A L_h y = M \quad (7-18)$$

$$\rho A L \ddot{y} + \rho A L_h (L_v + y_0) \ddot{\alpha} + \rho g A L_h \alpha + \frac{C_D}{2} \rho A \dot{y} |\dot{y}| + 2 \rho g A y = 0 \quad (7-19)$$

$$\text{其中 } J_d = \rho A \left[\frac{L_h^2 L_v}{2} + 2 y_0^2 L_v - 2 y_0 L_v^2 + \frac{2}{3} L_v^3 + L_h y_0^2 + \frac{1}{12} L_h^3 \right]。 \text{式(7-19)}$$

中阻尼項仍為非線性項，根據文獻可以一等值阻尼代替，亦即

$$\frac{C_D}{2} \rho A \dot{y} |\dot{y}| = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \rho A C_D \sigma_{\dot{y}} \dot{y} \quad (7-20)$$

其中 $\sigma_{\dot{y}}$ 為液面運動速度之標準差(Standard Deviation)。代入式(7-19)可得

$$\rho A L \ddot{y} + \rho A L_h (L_v + y_0) \ddot{\alpha} + \rho g A L_h \alpha + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \rho A C_D \sigma_{\dot{y}} \dot{y} + 2 \rho g A y = 0 \quad (7-21)$$

由式(7-21)顯示液面振動之自然頻率為 $\sqrt{2g/L}$

(B) 無因次化

為分析及應用上之方便考量，以下將式(7-18)、(7-21)作無因次化。令

$$\alpha^* = \alpha, \quad y^* = \frac{y}{L_2}, \quad t^* = \frac{t}{T_d}, \quad \text{其中 } T_d \text{ 為 TLCD 的自然週期, } T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = 2\pi\sqrt{\frac{L}{2g}}。$$

因此

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{d\alpha^*}{d(T_d dt^*)} = \frac{1}{T_d} \frac{d\alpha^*}{dt^*} = \frac{1}{T_d} \alpha^{*'}; \quad \frac{dy}{dt} = \frac{L_h dy^*}{d(T_d dt^*)} = \frac{L_h}{T_d} \frac{dy^*}{dt^*} = \frac{L_h}{T_d} y^{*'}.$$

同理

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{1}{T_d^2} \alpha^{*''}; \quad \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{L_h}{T_d^2} y^{*''}; \quad \sigma_{\dot{y}} = \frac{L_h}{T_d} \sigma_{y^{*'}},$$

代入式(7-18)、(7-21)，整理後得

$$(1+\mu)\alpha^{*''} + \gamma\eta y^{*''} + 4\pi\xi\beta_1\alpha^{*'} + 4\pi^2\left(\frac{\eta q}{2p} + \beta_1^2\right)\alpha^* + 2\pi^2\eta y^* = M^* \quad (7-22)$$

$$\gamma\alpha^{*''} + y^{*''} + \sqrt{\frac{2}{\pi}}C_D\sigma_{y^{*'}}py^{*'} + 2\pi^2\alpha^* + 4\pi^2y^* = 0 \quad (7-23)$$

其中 $\omega_s = \frac{k_\alpha}{J_\alpha}$ 為結構頻率； $\xi = \frac{c_\alpha}{2J_\alpha\omega_s}$ 為結構阻尼； $\mu = \frac{J_d}{J_\alpha}$ 為質量慣性矩比；

$p = \frac{L_h}{L}$ 為液柱水平段與總長比值； $\beta_1 = \frac{\omega_s}{\omega_d}$ 為結構與 TLCD 之頻率比；

$q = \frac{y_0}{L_h}$ ； $M^* = \frac{MT_d^2}{J_\alpha}$ ； $\gamma = \left(\frac{1}{2}(1-p) + pq\right)$ ； $\eta = \frac{\rho AL L_h^2}{J_\alpha}$ 。同時 J_d 可改寫為

$$J_d = \rho AL L_h^2 \left[\frac{1}{4}(1-p) + q^2(1-p) - \frac{1}{2}pq\left(\frac{1}{p}-1\right)^2 + \frac{1}{12p^2}(1-p)^3 + pq^2 + \frac{1}{12}p \right]$$

因此 η 可寫成

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\rho AL L_h^2}{J_\alpha} = \frac{\rho AL L_h^2}{J_d / \mu} \\ &= \frac{\mu}{\frac{1}{4}(1-p) + q^2(1-p) - \frac{1}{2}pq\left(\frac{1}{p}-1\right)^2 + \frac{1}{12p^2}(1-p)^3 + pq^2 + \frac{1}{12}p} \end{aligned}$$

為參數 μ 、 p 、 q 的函數。式(7-22)、(7-23)二式即為在白噪音擾動下扭轉向

TLCD 與單自由度結構互制之無因次化運動方程式。矩陣式表示為

$$\begin{bmatrix} 1+\mu & \gamma\eta \\ \gamma & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha^{*''} \\ y^{*''} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 4\pi\xi\beta_1 & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{2}{\pi}}C_D p \sigma_{y^*}' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha^{*'} \\ y^{*'} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 4\pi^2[\frac{\eta q}{2p} + \beta_1^2] & 0 \\ 0 & 4\pi^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha^* \\ y^* \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} M^* \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (7-24)$$

其中獨立參數有 μ 、 ξ 、 p 、 q 、 β_1 、 C_D 與 M^* 。

(C) 頻率反應函數之推導與性能評估標準

$$\text{令 } M^*(t^*) = M_0^* \cdot e^{i\omega t} = M_0^* \cdot e^{i\omega T_d t^*} = M_0^* \cdot e^{i2\pi k t^*}$$

$$\alpha^* = A_{\alpha^*} e^{i2\pi k t^*} ; \quad y^* = A_{y^*} e^{i2\pi k t^*} ; \quad \text{其中 } k = \frac{\omega}{\omega_d}$$

$$\text{因此, } \alpha^{*'} = A_{\alpha^*} (i2\pi k) e^{i2\pi k t^*} \quad y^{*'} = A_{y^*} (i2\pi k) e^{i2\pi k t^*}$$

$$\alpha^{*''} = -A_{\alpha^*} (4\pi^2 k^2) e^{i2\pi k t^*} \quad y^{*''} = -A_{y^*} (4\pi^2 k^2) e^{i2\pi k t^*}$$

代入式(7-22)、(7-23)，經整理後解得

$$A_{y^*} = H_1(k) \cdot M_0^* \quad (7-25)$$

$$A_{\alpha^*} = H_2(k) \cdot M_0^* \quad (7-26)$$

其中

$$H_1(k) = \frac{2k^2\gamma - 1}{G} \quad \text{為 } y^* \text{ 與 } M^* \text{ 之間的轉換函數} \quad (7-27)$$

$$H_2(k) = \frac{2 - 2k^2 + \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2}{\pi}} C_D \sigma_{y^*}' p k i}{G} \quad \text{為 } \alpha^* \text{ 與 } M^* \text{ 之間的轉換函數} \quad (7-28)$$

$$\begin{aligned} G = & [8\pi^2(1-k^2) \left(\left(\frac{\eta q}{2p} + \beta_1^2 \right) - k^2(1+\mu) \right) - 8\pi k^2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} C_D \sigma_{y^*}' p \xi \beta_1 \\ & - 2\pi^2 \eta (2k^2\gamma - 1)^2] + i [4\pi k \sqrt{\frac{2}{\pi}} C_D \sigma_{y^*}' p \left(\left(\frac{\eta q}{2p} + \beta_1^2 \right) - k^2(1+\mu) \right) \\ & + 16\pi^2(1-k^2)\xi\beta_1 k] \end{aligned} \quad (7-29)$$

以下為 y^* 與 α^* 的均方根平方之推導過程：首先建立有因次外力頻譜 S_M 與無因次外力頻譜 S_{M^*} 之關係，根據頻譜定義

$$S_M = \frac{1}{2\pi T} E[|\Phi(M(t))|^2]$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2\pi(T^* T_d)} E \left[\left| \int_0^\infty M(t) e^{-i\omega t} dt \right|^2 \right] \\
&= \frac{1}{2\pi(T^* T_d)} E \left[\frac{J_\alpha^2}{T_d^4} \cdot \left| \int_0^\infty M^*(t) e^{-i2\pi k t^*} d(T_d t^*) \right|^2 \right] \\
&= \frac{J_\alpha^2}{T_d^3} \cdot \frac{1}{2\pi T^*} E \left[\left| \int_0^\infty M^*(t) e^{-i2\pi k t^*} d t^* \right|^2 \right] \\
&= \frac{J_\alpha^2}{T_d^3} S_{M^*} \tag{7-30}
\end{aligned}$$

其中 T 為總時間長度； $T^* = \frac{T}{T_d}$ 為無因次總時間長度； $E[.]$ 代表平均值； $\Phi(.)$

代表傅立葉轉換（Fourier Transform），所以

$$\begin{aligned}
E[y^{*2}] &= E \left[\left(\frac{y}{L_h} \right)^2 \right] = \int_{-\infty}^\infty S_M \cdot \left| \frac{H_{yM}}{L_h} \right|^2 d\omega = \int_{-\infty}^\infty S_M \cdot |H_{y^*M}|^2 d\omega \\
&= \int_{-\infty}^\infty \frac{J_\alpha^2}{T_d^3} S_{M^*} \cdot \left| \frac{T_d^2}{J_\alpha} H_1(k) \right|^2 \cdot d(\omega_d k) = 2\pi S_{M^*} \int_{-\infty}^\infty |H_1(k)|^2 dk \tag{7-31}
\end{aligned}$$

其中 H_{yM} 為 y 與 $M(t)$ 之間的轉換函數。同理

$$E[\alpha^{*2}] = 2\pi S_{M^*} \int_{-\infty}^\infty |H_2(k)|^2 dk \tag{7-32}$$

另外， y^{**} 的均方根平方 $\sigma_{y^{**}}^2$ 之推導如下述。因為

$$\sigma_{\dot{y}}^2 = E[\dot{y}^2] = \int_{-\infty}^\infty |i\omega H_{yM}|^2 S_M d\omega = \int_{-\infty}^\infty |H_{y^*M}|^2 \omega^2 S_M d\omega \tag{7-33}$$

所以

$$\begin{aligned}
\sigma_{y^{**}}^2 &= \sigma_{\dot{y}}^2 \left(\frac{T_d}{L_h} \right)^2 = \int_{-\infty}^\infty \left| \frac{H_{yM}}{L_h} \right|^2 T_d^2 \omega^2 S_M d\omega = \int_{-\infty}^\infty |H_{y^*M}|^2 T_d^2 \omega^2 \square \frac{J_\alpha^2}{T_d^3} S_{M^*} d\omega \\
&= \int_{-\infty}^\infty \left| H_1 \frac{T_d}{J_\alpha} \right|^2 T_d^2 (\omega_d k)^2 \frac{J_\alpha^2}{T_d^3} S_{M^*} (\omega_d dk) = (2\pi)^3 S_{M^*} \int_{-\infty}^\infty |ik \square H_1(k)|^2 dk \tag{7-34}
\end{aligned}$$

為比較不同參數下之減振效果，性能評估標準乃是將橋面版扭轉角度之均方根平方 $E[\alpha^2]$ 除以相同擾動下之單自由度反應之均方根平方 $E[\alpha_0^2]$ 作正規化，亦

即

$$E[\alpha^{*2}]_{norm} = \frac{E[\alpha^{*2}]}{E[\alpha_0^2]} = 32\pi^3 \xi \beta_1^3 \int_{-\infty}^{\infty} |H_2(k)|^2 dk \quad (7-35)$$

$$\text{其中無控下之反應之均方根平方 } E[\alpha_0^2] = \frac{\pi S_M}{2\xi J_\alpha^2 \omega_s^3} = \frac{\pi S_{M^*}}{2\xi \omega_s^3 T_d^3} = \frac{\pi S_{M^*}}{2\xi \beta_1^3 (2\pi)^3}。$$

同理

$$E[y^{*2}]_{norm} = \frac{E[y^{*2}]}{E[\alpha_0^2]} = 32\pi^3 \xi \beta_1^3 \int_{-\infty}^{\infty} |H_1(k)|^2 dk \quad (7-36)$$

根據隨機振動理論， $E[\alpha^{*2}]_{norm}$ （式 7-35） $E[y^{*2}]_{norm}$ （式 7-36） $\sigma_{y^*}^2$ （式 7-34）可表示成如下簡單理論式：

$$E[\alpha^{*2}]_{norm} = 32\pi^4 \xi \beta_1^3 \left(\frac{4(A_2 A_3 - A_1 A_4) / A_0 + A_3(B_1^2 - 8) + 4A_1}{A_1(A_2 A_3 - A_1 A_4) - A_0 A_3^2} \right) \quad (7-37)$$

$$E[y^{*2}]_{norm} = 32\pi^4 \xi \beta_1^3 \left(\frac{(A_2 A_3 - A_1 A_4) / A_0 - 4A_3\gamma + 4A_1\gamma^2}{A_1(A_2 A_3 - A_1 A_4) - A_0 A_3^2} \right) \quad (7-38)$$

$$\sigma_{y^*}^2 = 8\pi^4 S_{M^*} \cdot \frac{A_3 - 4\gamma A_1 + 4\gamma^2(A_1 A_2 - A_0 A_3) / A_4}{A_1(A_2 A_3 - A_1 A_4) - A_0 A_3^2} \quad (7-39)$$

$$\text{其中 } A_0 = \frac{4\pi^2 \eta q}{p} - 2\pi^2 \eta + 8\pi^2 \beta_1^2 ;$$

$$A_1 = 2\sqrt{2\pi} C_D \sigma_{y^*} \eta q + 16\pi^2 \xi \beta_1 + 4\sqrt{2\pi} C_D p \sigma_{y^*} \beta_1^2 ;$$

$$A_2 = \frac{4\pi^2 \eta q}{p} - 8\pi^2 \gamma \eta + 8\pi^2 (1 + \mu + \beta_1^2) + 8\sqrt{2\pi} C_D p \sigma_{y^*} \xi \beta_1 ;$$

$$A_3 = 16\pi^2 \xi \beta_1 + 4\sqrt{2\pi} C_D p \sigma_{y^*} (1 + \mu) ;$$

$$A_4 = 8\pi^2 (1 + \mu - \gamma^2 \eta) ; \quad B_1 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2}{\pi}} C_D p \sigma_{y^*}$$

值得注意的是，計算 $E[\alpha^{*2}]_{norm}$ 、 $E[y^{*2}]_{norm}$ 時必須用到 σ_{y^*} ，因此 σ_{y^*} 需利用式(7-39)以疊代法先行求得。

(D) TLCD 之最佳化參數

因為 y_0 為橋面版旋轉中心到水平管中心的距離，以設計之角度而言，使用 $\frac{y_0}{L} = \frac{L_2}{L} \cdot \frac{y_0}{L_2} = p \cdot q$ 為一設計參數較為方便。改變 pq 、 ξ 、 μ 、 p 、 β_1 、 C_D 、 S_{M^*} 等參數，代入式(7-39)以疊代法先行求出 σ_{y^*} ，求得 σ_{y^*} 後再將所有的參數代入式(7-37)、式(7-38)求 $E[\alpha^{*2}]_{norm}$ 及 $E[y^{*2}]_{norm}$ 。通常參數 ξ 、 S_{M^*} 為已知， μ 、 p 、 $p \cdot q$ 可由設計者先行決定，因此待決定之最佳設計參數只剩 β_1 、 C_D ，取 $E[\alpha^{*2}]_{norm}$ 的最小值，其所對應的 β_1 、 C_D 即為最佳設計參數 $\beta_{1,opt}$ 、 $C_{D,opt}$ 。再計算過程中亦發現 S_{M^*} 與 $C_{D,opt}$ 成比例關係，事實上，此關係可直接由理論式中窺知。表一中在水頭損失係數 C_D 欄裡有三個值，中間的值是減振效果最好時所對應的最佳水頭損失係數 $C_{D,opt}$ ，而左右兩個 C_D 值則是當減振效果達 95% 之最佳狀況的時所對應的水頭損失係數，可作為設計時之參考。

表 7.1：白噪音擾動下 TLCD 扭轉向運動之最佳設計參數與減振效果

$p \cdot q = 0$, $\mu = 0.01$, $\gamma = 0.01$

p	$\beta_{1,opt}$	$C_{D,opt}(\propto \sqrt{10^{-4}/S_{M^*}})$	$E[\alpha^{*2}]_{norm}$	$E[y^{*2}]_{norm}$
0.5	1.002	4.415 - 8.827 - 18.462	0.46563116708464	4.07785587234962
0.6	1.001	6.435 - 12.122 - 23.572	0.38286663966186	2.75691792499126
0.7	1.000	8.622 - 15.669 - 29.125	0.32173906702230	1.98624515477608
0.8	0.999	11.171 - 19.809 - 35.809	0.27370995501163	1.46662476820523
0.9	0.998	14.443 - 25.141 - 44.445	0.23375081670847	1.07904094700977

$p \cdot q = 0$, $\mu = 0.01$, $\gamma = 0.02$

p	$\beta_{1,opt}$	$C_{D,opt}(\propto \sqrt{10^{-4}/S_{M^*}})$	$E[\alpha^{*2}]_{norm}$	$E[y^{*2}]_{norm}$
0.5	1.001	4.415 - 11.359 - 32.601	0.67006840851090	5.04207451769567
0.6	1.000	6.215 - 14.890 - 36.092	0.58325980323554	3.72775658448477
0.7	0.999	8.945 - 18.614 - 40.923	0.51142350527075	2.86446823977502
0.8	0.998	11.616 - 22.931 - 47.245	0.45000006514708	2.22343706310373
0.9	0.997	15.012 - 28.494 - 55.966	0.39534276814907	1.70457721865992

$p \cdot q = 0$, $\mu = 0.01$, $\gamma = 0.03$

p	$\beta_{1,opt}$	$C_{D,opt}(\propto \sqrt{10^{-4}/S_{M^*}})$	$E[\alpha^{*2}]_{norm}$	$E[y^{*2}]_{norm}$
0.5	1.000	4.089 - 14.004 - 58.567	0.77768847350943	5.11155071459602
0.6	0.999	6.486 - 17.760 - 55.345	0.70117715233249	4.01894681998862
0.7	0.998	8.988 - 21.652 - 57.255	0.63261918649356	3.23706748594811
0.8	0.997	11.812 - 26.142 - 62.117	0.57021760907153	2.61038113569917
0.9	0.996	15.355 - 31.934 - 70.266	0.51173198981393	2.06771353881367

$p \cdot q = 0$, $\mu = 0.02$, $\gamma = 0.01$

p	$\beta_{1,opt}$	$C_{D,opt}(\propto \sqrt{10^{-4}/S_{M^*}})$	$E[\alpha^{*2}]_{norm}$	$E[y^{*2}]_{norm}$
0.5	1.004	10.660 - 19.945 - 38.464	0.37140398409551	1.69435087317853
0.6	1.002	15.594 - 28.006 - 51.403	0.29859759506926	1.10576989937839
0.7	1.000	21.000 - 36.787 - 65.537	0.24712805886017	0.77769791063061
0.8	0.997	27.503 - 47.370 - 82.693	0.20794269530615	0.56153744165885
0.9	0.995	35.727 - 60.741 - 104.417	0.17614211599399	0.40783629580426

$p \cdot q = 0$, $\mu = 0.02$, $\sigma = 0.02$

p	$\beta_{1,opt}$	$C_{D,opt}(\propto \sqrt{10^4 / S_{M^*}})$	$E[\alpha^{*2}]_{norm}$	$E[y^{*2}]_{norm}$
0.5	1.003	11.018 - 24.428 - 58.131	0.57116590999714	2.32057125068845
0.6	1.000	16.356 - 33.197 - 70.766	0.48314846748159	1.62550549443068
0.7	0.998	22.012 - 42.360 - 84.599	0.41463926899283	1.20681004005399
0.8	0.996	28.590 - 53.066 - 101.426	0.35874956837687	0.91202453105786
0.9	0.994	37.042 - 66.918 - 123.800	0.31090380288683	0.68422725705882

$p \cdot q = 0$, $\mu = 0.02$, $\sigma = 0.03$

p	$\beta_{1,opt}$	$C_{D,opt}(\propto \sqrt{10^4 / S_{M^*}})$	$E[\alpha^{*2}]_{norm}$	$E[y^{*2}]_{norm}$
0.5	1.001	10.989 - 29.398 - 88.991	0.69091502318822	2.50491585732646
0.6	0.999	16.594 38.392 - 96.528	0.60521033211474	1.87106043357946
0.7	0.997	22.539 - 47.899 - 108.255	0.53346846688405	1.44856371139722
0.8	0.995	29.375 - 58.966 - 124.175	0.47164529883286	1.13126388360467
0.9	0.993	38.091 - 73.300 - 146.565	0.41634531284846	0.87221480490380

$p \cdot q = 0.1$, $\mu = 0.01$, $\sigma = 0.01$

p	$\beta_{1,opt}$	$C_{D,opt}(\propto \sqrt{10^4 / S_{M^*}})$	$E[\alpha^{*2}]_{norm}$	$E[y^{*2}]_{norm}$
0.5	0.997	2.224 - 5.182 - 13.095	0.60202990153054	4.53350971391819
0.6	0.997	3.457 - 7.130 - 15.489	0.49657212918552	3.45103980465575
0.7	0.997	4.835 - 9.329 - 18.676	0.41517050039285	2.64373322538040
0.8	0.997	6.505 - 12.027 - 22.861	0.34986781776809	2.00905480894135
0.9	0.996	8.762 - 15.720 - 28.818	0.29536564207208	1.48575634354192

$p \cdot q = 0.1$, $\mu = 0.01$, $\sigma = 0.02$

p	$\beta_{1,opt}$	$C_{D,opt}(\propto \sqrt{10^4 / S_{M^*}})$	$E[\alpha^{*2}]_{norm}$	$E[y^{*2}]_{norm}$
0.5	0.996	1.981 - 7.311 - 33.731	0.78758863624099	4.75878458672701
0.6	0.996	3.399 - 9.389 - 29.525	0.69836114062143	4.10540770809335
0.7	0.996	4.930 - 11.703 - 30.325	0.61768285697558	3.44348132375065
0.8	0.996	6.732 - 14.540 - 33.481	0.54477798165688	2.80733874267642
0.9	0.995	9.111 - 18.441 - 39.178	0.47789492016107	2.19915404877164

$p \cdot q = 0.1$, $\mu = 0.01$, $\sigma = 0.03$

p	$\beta_{1,opt}$	$C_{D,opt}(\propto \sqrt{10^4/S_{M^*}})$	$E[\alpha^{*2}]_{norm}$	$E[y^{*2}]_{norm}$
0.5	0.995	1.487 - 9.642 - 100.301	0.86825499452524	4.33675534479023
0.6	0.995	3.050 - 11.793 - 58.259	0.79989484354491	4.05193374215318
0.7	0.995	4.746 - 14.192 - 49.635	0.73149655739949	3.61396978416096
0.8	0.994	6.741 - 17.272 - 49.405	0.66444587183638	3.08019911872642
0.9	0.994	9.227 - 21.254 - 53.119	0.59858584231980	2.53407593450069

$p \cdot q = 0.1$, $\mu = 0.02$, $\sigma = 0.01$

p	$\beta_{1,opt}$	$C_{D,opt}(\propto \sqrt{10^4/S_{M^*}})$	$E[\alpha^{*2}]_{norm}$	$E[y^{*2}]_{norm}$
0.5	0.995	5.463 - 11.317 - 24.716	0.49544374037471	1.99332790120886
0.6	0.995	8.418 - 16.075 - 31.776	0.39596017816630	1.43918980806201
0.7	0.994	11.854 - 21.642 - 40.508	0.32389735698803	1.05851756608533
0.8	0.993	16.037 - 28.432 - 51.375	0.26855462310370	0.78238346879961
0.9	0.991	21.711 - 37.696 - 66.438	0.22388969128547	0.56700441079852

$p \cdot q = 0.1$, $\mu = 0.02$, $\sigma = 0.02$

p	$\beta_{1,opt}$	$C_{D,opt}(\propto \sqrt{10^4/S_{M^*}})$	$E[\alpha^{*2}]_{norm}$	$E[y^{*2}]_{norm}$
0.5	0.993	5.473 - 15.311 - 49.006	0.69622864002323	2.33154562053976
0.6	0.993	8.751 - 20.329 - 51.262	0.59677806775380	1.89158473441689
0.7	0.993	12.332 - 25.913 - 57.662	0.51371553328807	1.51885617503397
0.8	0.991	16.841 - 33.246 - 68.477	0.44307957339899	1.18331563914297
0.9	0.989	22.748 - 42.956 - 83.824	0.38142629764304	0.89935775093134

$p \cdot q = 0.1$, $\mu = 0.02$, $\sigma = 0.03$

p	$\beta_{1,opt}$	$C_{D,opt}(\propto \sqrt{10^4/S_{M^*}})$	$E[\alpha^{*2}]_{norm}$	$E[y^{*2}]_{norm}$
0.5	0.991	4.998 - 19.831 - 102.149	0.79715830656809	2.25887422999221
0.6	0.991	8.640 - 24.969 - 83.610	0.71257109560402	1.98937898279827
0.7	0.991	12.534 - 30.704 - 83.016	0.63452604658031	1.69540883858050
0.8	0.990	17.197 - 38.052 - 90.442	0.56293434461233	1.39234943675012
0.9	0.988	23.357 - 48.173 - 104.885	0.49652272875938	1.09875501472884

II. TLCD 之模型建構與架設：

本實驗製作之 TLCD 模型，詳細之規格如圖 7.11 及表 7.2 所示。其中： L_h 為 TLCD 液柱之水平管長、 L_v 為 TLCD 液柱之垂直長度、液柱總長 $L=L_h+2L_v$ 、 W 為 TLCD 之寬度、 d 為 TLCD 管內之寬度、 R 為 TLCD 內開孔之孔隙遮蔽率、 y_0 為 TLCD 水平管距離轉動中心之長度。TLCD 模型材質以硬壓克力為主。TLCD 模型之孔隙遮蔽率分別有 20 %、40 %、60 % 及 80% 四種，完成模型如圖 7.12 所示。

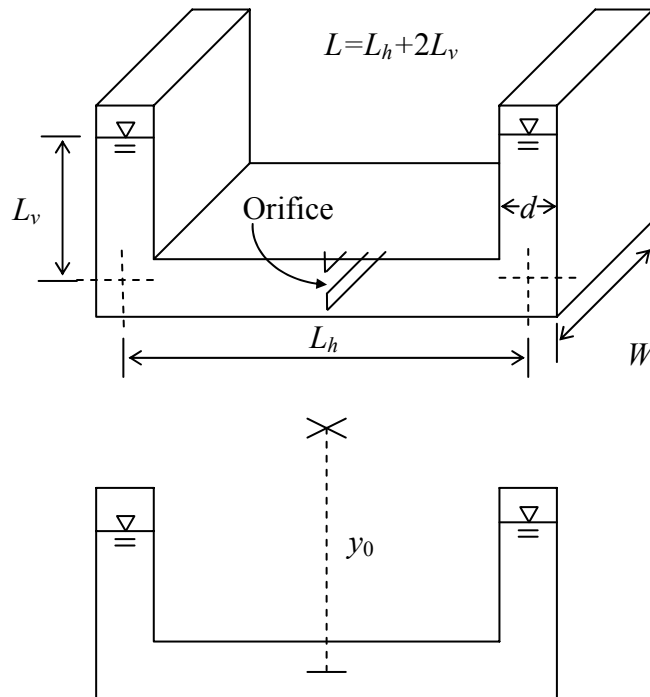


圖 7.11：TLCD 規格示意圖

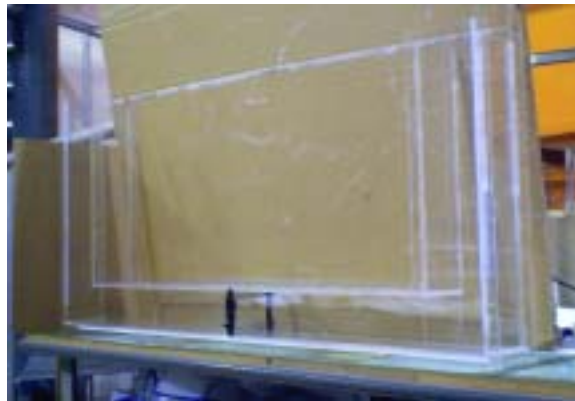


圖 7.12：TLCD 完成模

表 7.2： TLCD 尺寸規格表

編號	L_h (cm)	L (cm)	W (cm)	d (cm)	R (%)	y_0 (cm)
1	100	140	10	10	20, 40, 60, 80%	11.5
2	100	150	10	10	20, 40, 60, 80%	11.5
3	100	160	10	10	20, 40, 60, 80%	11.5
4	100	170	10	10	20, 40, 60, 80%	11.5

TLCD 內液面之反應量測乃利用一保利龍小方塊內放置一加速度計，以量測 TLCD 內液面之擺盪反應，但必須將加速度轉成位移，務必小心注意的是加速度計防水的處理，另外加速度計線頭要預留適當的移動長度，讓線頭可以隨著液面起伏作彈性運動，如此才不會影響液面量測的結果。進行強制振動時將 TLCD 架設於振動台中央，於橋面版中央兩側分別安裝兩個加速度計，兩者之間的距離為 32cm，以量測橋面版之振動反應；同樣於振動平台中央位置兩側分別安裝兩個加速度計，兩者之間的距離為 50cm，以量測振動平台之振動反應。

III. TLCD 元件性能測試

(A) 自由振動性能測試

TLCD 之液柱全長範圍 L 從 140~180cm，予水面一初始位移之後釋放，量測 TLCD 液面之自由震盪，由歷時反應與頻率域反應了解隨 TLCD 全長變化時，水面震盪之頻率變化，並與理論之自然頻率 $\frac{1}{2\pi}\sqrt{2g/L}$ (Hz) 作一比較。結果如表 7.3 所示。

表 7.3：TLCD 實驗與理論頻率比較表

液體全長 (cm)	理論頻率 (Hz)	實驗頻率 (Hz)	誤差 (%)
140	0.596	0.610	2.43
150	0.576	0.588	2.08
160	0.557	0.568	1.74
170	0.541	0.553	2.29

(B) 強制振動性能測試

直接將受測元件TLCD置於震動平台上，如圖7.13所示。以轉動向之簡諧（Harmonic）震動模擬橋面版之振動，平台振動頻率由0.35~1.0 (Hz)變化，分別量測TLCD之液面位移振幅反應。在每個孔隙遮蔽率R之下，改變TLCD液體全長獲得的實驗結果與數值模擬作相互比對，用以率定水頭損失係數。水頭流失係數之經驗式為

$$\eta = \left[(1 - A_1 / A) + 0.707(1 - A_1 / A)^{0.375} \right]^2 (A / A_1)^2 \quad (7-40)$$

與管流截孔開孔率有關，其中 A_1 為管流截孔面積。比較結果如表7.4所示。

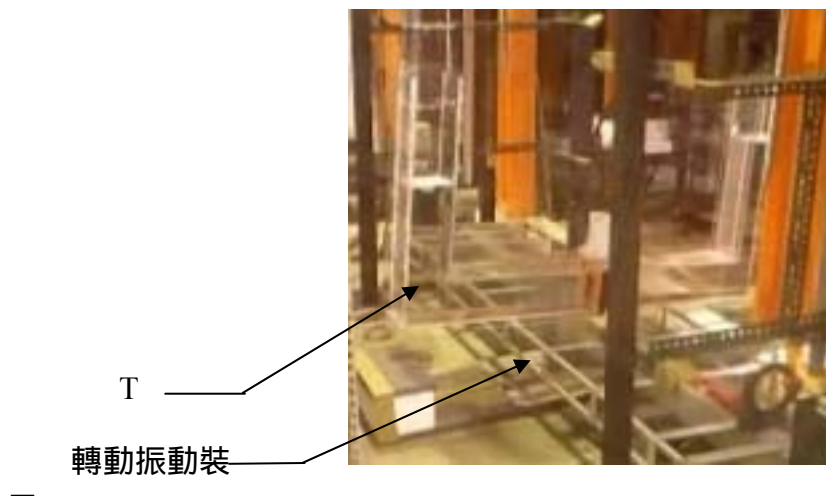


圖 7.13：TLCD 強制振動實

表 7.4：強制振動下 TLCD 之水頭損失係數比較表(R=20%)

液體全長 (cm)	實驗頻率 (Hz)	強制振動振幅 D_a (angle: rad)	實驗水頭損失係數 C_D	經驗水頭損失係數 (式(7-40))
140	0.610	0.022	3.6	0.538
150	0.588	0.022	3.6	0.538
160	0.568	0.022	3.4	0.538
170	0.553	0.022	3.4	0.538

表 7.5：強制振動下 TLCD 之水頭損失係數比較表(R=40%)

液體全長 (cm)	實驗頻率 (Hz)	強制振動振幅 D_α (angle: rad)	實驗水頭損失係數 C_D	經驗水頭損失係數 (式(7-40))
140	0.610	0.022	5.4	2.257
150	0.588	0.022	5.1	2.257
160	0.568	0.022	5.3	2.257
170	0.553	0.022	5.4	2.257

表 7.6：強制振動下 TLCD 之水頭損失係數比較表(R=60%)

液體全長 (cm)	實驗頻率 (Hz)	強制振動振幅 D_α (angle: rad)	實驗水頭損失係數 C_D	經驗水頭損失係數 (式(7-40))
140	0.610	0.022	12.5	8.758
150	0.588	0.022	12.4	8.758
160	0.568	0.022	12.6	8.758
170	0.553	0.022	12.4	8.758

表 7.7：強制振動下 TLCD 之水頭損失係數比較表(R=80%)

液體全長 (cm)	實驗頻率 (Hz)	強制振動振幅 D_α (angle: rad)	實驗水頭損失係數 C_D	經驗水頭損失係數 (式(7-40))
140	0.610	0.022	43.0	52.580
150	0.588	0.022	43.0	52.580
160	0.568	0.022	44.0	52.580
170	0.553	0.022	43.5	52.580

第八章 長跨徑橋梁風洞試驗方法與技術的提升

8-1 計畫目的

本研究計畫是以風洞模型試驗評估淡水漁人碼頭情人橋之空氣動力穩定性。本計畫主體之人行橋全長為163.9公尺，橫跨淡水河為一特殊造形斜張橋梁，由於橋梁的幾何造型及結構系統，有可能在設計風速之內發生危害結構的空氣不穩定現象，應予以審慎評估。此外就本橋梁的功能性來說，主要提供行人在此橋梁上行走，因此對於行人來說，最要緊的莫過是一種平穩的感覺，若是橋樑的位移過大，或是有較大的擺動，都將會造成不舒適感。因此對於橋梁本身氣動力穩定性之效應進行風洞試驗，以確保橋梁主體之安全性。

為了確實掌握該橋的振態及其相關反應。本計畫採用全橋模型之風洞試驗量測顫振臨界風速與不同風速下之動態反應。

8-2 計畫內容與研究方法

8-2-1 計畫內容

本研究計畫實驗採用全橋模型試驗，以下分別對此試驗做一簡介。

8-2-1-1 全橋模型試驗

全橋模型風洞試驗所使用的風洞為風工程研究中心之大氣邊界層風洞，屬於開放吸入式風洞。試驗斷面長18.7公尺、高2.0公尺、寬3.2公尺。風洞之有效風速範圍為2 m/s~15 m/s。設有直徑3公尺之油壓升降式旋轉工作平台，並配有數位式角度計可精確量測旋轉角度。主要流場分為平滑流場及紊流場。以橋梁中心之垂直風向為準，主要試驗風向角在 $+30^{\circ}$ 至 -30° 間。

全橋模型試驗主要實驗內容分為：(1) 顫振臨界風速、扭轉不穩定、(2) 抖振反應、渦流顫振，其內容如下表8.1所示。

	流場特性	風向角 (Yaw Angle) 變化	風速
顫振臨界風速	平滑流場	+ 30 ° - 30 ° 間距為15 °	高於設計風速
	紊流邊界場	+ 30 ° - 30 ° 間距為15 °	高於設計風速
扭轉 不穩定 評估	平滑流場	+ 30 ° - 30 ° 間距為15 °	高於設計風速
	紊流邊界場	+ 30 ° - 30 ° 間距為15 °	高於設計風速
抖振 反應	平滑流場	+ 30 ° - 30 ° 間距為15 °	低於設計風速
	紊流邊界場	+ 30 ° - 30 ° 間距為15 °	低於設計風速
渦流 顫振	平滑流場	+ 30 ° - 30 ° 間距為15 °	低於設計風速
	紊流邊界場	+ 30 ° - 30 ° 間距為15 °	低於設計風速

表8.1：全橋模型風洞試驗分項表

8-2-2 風洞實驗設計

8-2-2-1 模擬相似率

模型進行風洞實驗時，須遵守模型氣彈力相似性模擬原則，包括風洞流場特性、模型特徵長度縮尺、空氣密度及黏滯力、風速、及因重力影響所導致的加速度...等。

這些物理上的特質則以下述幾點討論：

(1) 雷諾數 (Reynolds Number (Re))：

$$\left(\frac{\rho U D}{\mu} \right) = \frac{\text{流體慣性力}}{\text{流體黏滯力}}$$

雷諾數為空氣的慣性力與黏滯力的比值，配合不同的風速（U）以及特徵尺度（D）便可得到實驗所需的雷諾數。

$$\left(\frac{\rho U D}{\mu} \right)_m = \left(\frac{\rho U D}{\mu} \right)_p \quad (8-1)$$

式中下標m為模型，p為原型。

其中 μ 為流體黏滯係數，與溫度有關，在25℃約為 $1.82 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{S} / \text{m}^2$

可是一般的風洞實驗無法達到 $R_e = 10^7 \sim 10^8$ 之實場狀況。在縮尺模擬中，大氣邊界層的雷諾數超過 10^5 時，以及鈍體氣動力實驗之雷諾數超過 10^4 時，縮尺模擬的流場特性已不受雷諾數大小的影響。本研究計劃中各項實驗的雷諾數均保持在 5.6×10^4 以上，以滿足雷諾數獨立性的模擬要求。

（2）福祿數（Froude Number）：

$$\left(\frac{U^2}{Dg} \right)_m = \left(\frac{U^2}{Dg} \right)_p \quad (8-2)$$

福祿數為空氣的慣性力和由重力或浮力或造成之垂直力的比值為滿足垂直向動力特性上的一致。當縮尺模型需考慮重力影響時，則模型與原型間須滿足福祿數的相似性要求。

（3）密度比（Density Ratio）：

$$\frac{\rho_s}{\rho_f} = \frac{\text{結構平均質量密度}}{\text{空氣平均質量密度}} = \frac{\text{結構的慣性力}}{\text{空氣的慣性力}}$$

密度比代表了結構慣性力和空氣慣性力的比值。所以模型應依實場結構的密度來模擬，模型密度比應符合原型。

$$\left(\frac{\rho_s}{\rho_f} \right)_m = \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} \right)_p \quad (8-3)$$

(4) 彈性比 (或稱Cauchy Number):

$$\frac{E}{\rho U^2} = \frac{\text{結構的彈性力}}{\text{流體的慣性力}}$$

由於勁度比的模擬將影響結構的自然頻率，故須將模型的勁度比模擬和原型相同。然而在模型的製作上，對於勁度比的模擬相當困難，所以一般在實際的運用上是以質量比與史特赫數 (Strouhal Num-ber) 為模擬基準。換句話說，若模型和原型能夠符合質量的模擬，且滿足史特赫數時，則勁度比即能符合。

$$\left(\frac{f_0 D}{U} \right)_m = \left(\frac{f_0 D}{U} \right)_p \quad (8-4)$$

其中 f_0 : 為結構的自然頻率

由於模型與原型之間必須保持頻率比一致，則必須滿足

$$\left(\frac{f_i}{f_j} \right)_m = \left(\frac{f_i}{f_j} \right)_p \quad (8-5)$$

(模型 i 振態與 j 振態的頻率比應與原型相同)

(5) 阻尼比 (Damping Ratio):

阻尼比為結構振動週期中的能量損耗率，因此阻尼比的大小將影響結構位移反應的大小，所以為預測結構反應很重要的一項參數。

$$(\xi)_m = (\xi)_p \quad (8-6)$$

所以模型的阻尼必須和原型相同。

根據前述模擬相似率所訂定的風洞試驗模型縮尺參數如下表8.2：

Parameters	符號	斷面模型	全橋模型
幾何縮尺	λ_L	1/20	1/70
速度縮尺	λ_V	$1/\sqrt{20}$	$1/\sqrt{70}$
時間縮尺	$\lambda_T = \lambda_L/\lambda_V$	$1/\sqrt{20}$	$1/\sqrt{70}$
頻率縮尺	$\lambda_f = 1/\lambda_T$	$\sqrt{20}$	$\sqrt{70}$
密度縮尺	λ_ρ	1	1
阻尼比	λ_ξ	1	1

表8.2：橋梁實驗模型縮尺參數一覽表

8-2-2-2 全橋模型設計斷面

全橋模型風洞試驗將在淡江大學風工程研究中心的第一號邊界層風洞執行。風洞的試驗段為2.0m高（可調至2.2m）、3.2m寬、18.0m長，並設有3.0m直徑之轉盤。以橋梁中心之垂直風向為準，以逆時針旋轉為正，主要試驗風向角在 $+30^\circ$ 至 -30° 間，以 15° 為間距。其位移反應量測方式，利用設計風速下之不同風速條件，使用遠距與短距雷射位移計，量測橋塔頂端、橋梁斷面單點與橋面版沿橋軸方向（Spanwise）之垂直與扭轉位移反應。

依據風洞物理模擬求得橋梁架構之所需資料與尺寸，全橋模型考慮時間、長度及速度縮尺、質量模型則考慮密度比之模擬，其模型設計方式如下：

設計全橋模型之橋面板：將模型縮尺設計為1:70，其縮尺比例關係如表8.3，依據原型橋梁特性予以模擬，則全橋模型跨徑長約2.6公尺、橋面版寬11.4公分、橋面版深2.85公分。

模型斷面形狀：

如圖 8.1

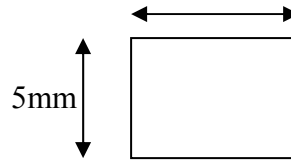


圖8.1：情人橋模型橋面板斷面形狀

<u>長度縮尺</u> : $\lambda_L = 1/70$
<u>速度縮尺</u> : $\lambda_v = 1/\sqrt{70}$ $\lambda_v = \lambda_L^{1/2}$
<u>頻率縮尺</u> : $\lambda_f = \sqrt{70}$
<u>時間縮尺</u> : $\lambda_t = 1/\sqrt{70}$ $\lambda_t = \frac{\lambda_L}{\lambda_v}$
<u>密度縮尺</u> : $\lambda_\rho = 1$
<u>單位長度質量縮尺</u> : $\lambda_m = (1/70)^2$
<u>單位長度轉動慣量縮尺</u> : $\lambda_{I\alpha} = (1/70)^4$
<u>總質量縮尺</u> : $\lambda_M = (1/70)^3$
<u>轉動慣量縮尺</u> : $\lambda_{I\alpha} = \lambda_M * \lambda_L^2 = \lambda_\rho * \lambda_L^5 = (1/70)^5$
<u>材料 E 值縮尺</u> : 鋼: $\lambda_E = 1$
<u>材料 G 值縮尺</u> : 鋼: $\lambda_G = 1$
<u>I 值縮尺</u> : 鋼: $\lambda_I = 66.5 * (\frac{1}{70})^6$
<u>J 值縮尺</u> : 鋼: $\lambda_J = 66.5 * (\frac{1}{70})^6$

表 8.3：情人橋縮尺比例

模型 I, J 值:

	實際值	斷面設計
I_3	0.00695~0.0078 (cm ⁴)	0.007292(cm ⁴)
I_2	0.01679~0.0173 (cm ⁴)	0.014292(cm ⁴)
J	0.02374~0.0251 (cm ⁴)	0.021583(cm ⁴)

表 8.4：情人橋模型 I, J 值比較

橋塔設計：實際橋樑的橋塔斷面為一變斷面，因此依照其 I 、 J 設計模型，會產生製作上的困難。最終的解決方案就是採固定斷面，平均值設計，將橋塔頻率控制在一定範圍內，再藉由質量分佈或邊界條件上的螺絲調整至正確值。設計尺寸如圖8.2。

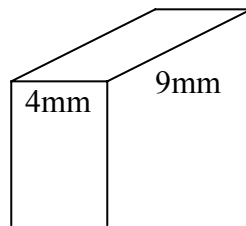


圖 8.2：情人橋模型橋塔斷面形狀

cabLe勁度與拖曳力模擬：

勁度模擬：人行橋cabLe共14組，就其吊拉位置來分共有7組計算後模型，cabLe勁度參考表8.5。

Cable	1	2	3	4	5	6	7
實際長度 L(m)	68.1962	59.02	50.4717	41.9322	34.6041	68.2041	70.6112
斷面積 A(m ²)	0.0007	0.0007	0.0007	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015
E 值(kg/m ²)	2.1E+10	2.1E+10	2.1E+10	2.1E+10	2.1E+10	2.1E+10	2.1E+10
實際勁度 K(kg/m)	215554.53	249068.11	291252.32	751212.67	910296.75	461849.06	446104.86
K 值縮尺	0.000204082	0.000204082	0.000204082	0.000204082	0.000204082	0.000204082	0.000204082
模型勁度 K(kg/m)	43.99	50.83	59.439	153.30	185.77	94.25	91.041

表 8.5：情人橋全模型 cable 勁度

拖曳力模擬：

(a) 根據實際結構 cable 尺寸先計算出雷諾數 $R_e = \frac{UD}{\nu}$ 。(U 採設計風速

49.38m/s，D 為 cable 直徑， $\nu=0.15\text{cm}^2/\text{s}$)

(b) 查表可得風力係數 C_D

(c) 依據 C_D 值計算出實際結構 F_D ($C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 DL}$ ， ρ 為空氣密度 1.22kg/m^3 ，L

為 cable 長度)，並依縮尺得到模型 F_D'

(d) 選定模擬 cable drag force 的圓管直徑尺寸 D' 並計算雷諾數 R_e' ，查表得模型

cable C_D' 值。

(e) 經由以上計算便可得圓管裝置長度 L' 。

全橋模型基本設計完成其鋼架結構如圖8.3所示，將橋面板依纜索分佈狀況做隔板如圖8.4，再將與原型橋梁依縮尺後之單位長度質量與模型之差值分佈在橋面板上，最後再將全橋模型剛架利用巴沙木做出造型如圖8.5。



圖8.3：情人橋模型骨架

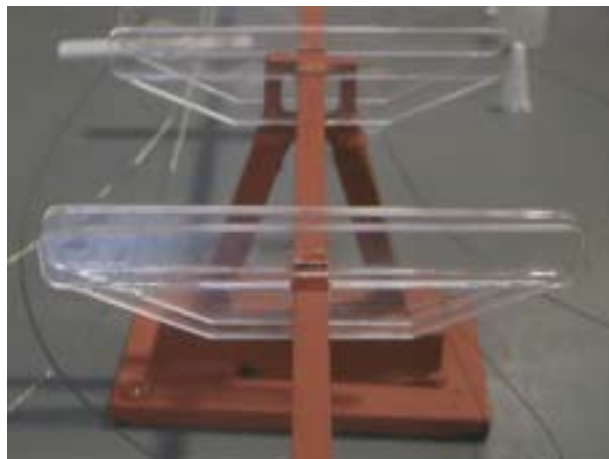


圖8.4：情人橋模型外型支撐架



圖8.5：情人橋模型外型造型完成圖

8-2-2-3 全橋模型實驗項目

(1) 顫振臨界風速

實驗將全橋模型依照模型與原型間相似性原則，模擬其質量與結構之扭轉、垂直頻率及振態，實驗流場以平滑流場與紊流邊界場為主，以橋梁中心之垂直風向為準，風向角 $+30^\circ$ 至 -30° 、間距為 15° 共5個角度下得到該條件下之顫振臨界風速。

(2) 扭轉不穩定

扭轉不穩定現象為一單自由度運動；其發生之原因為扭轉向風力隨風攻角的增加而遞增，所造成的扭轉彎矩亦將隨之增加，此時橋梁斷面必須以更大的抵抗彎矩來與之抗衡，如此反覆作用，當到達某一風速時，橋梁斷面所承受的扭轉彎矩超過橋梁斷面所能抵抗的能力時，將使橋梁結構產生不穩定之現象而破壞。

(3) 抖振反應

抖振，是由於逼近流的擾動風速對結構系統造成一不穩定載重而產生的振動現象。在實際應用上為假設外力符合準穩定定理 (Quasi-Steady theory) 然後使用散漫振動理論 (Random Vibration theory) 來分析。

一般抖振效應不僅與紊流特性有關，也和橋梁斷面之幾何形狀及橋梁基本振態有關。橋梁的抖振效應通常不會導致橋體的破壞，但在設計風速下，若橋梁斷面有太大的位移量，會引起車輛和行人感到不適，亦可能在長期作用下使得橋梁材料有疲乏 (fatigue) 之虞。

(4) 渦流顫振

渦流顫振發生的原因為流體流經鈍體產生分離後，使得結構體的上下側交互產生週期性的渦漩，由於上下側的渦漩形成時間不一致，造成結構體上下側壓力的不同，而導致結構物在垂直方向振動，即為渦流顫振現象。當渦散頻率與橋梁結構體某一振態之頻率一致時，則會造成共振 (resonance) 現象，使得渦散頻率被鎖在結構物基本自然頻率上，直到風速增加至脫離氣流與結構體交互作用之影響。

渦散頻率一般以無因次化頻率表示即為史特赫數 (Strouhal No.) 其定義為：

$$S_i = \frac{f_s \times D}{U} \quad (8-7)$$

其中， f_s ：渦散頻率、 D ：結構特徵尺度。【1】

8-3全模型風洞試驗結果

8-3-1 情人橋實驗結果

圖8.6至圖8.15為全橋模型試驗在平滑流場及邊界紊流場下之振動反應，其中（a）圖為平均值、（b）為均方根值、（c）為極大值，主要風向角以橋梁中心之垂直風向為準，以逆時針旋轉為正，主要試驗風向角在 $+30^\circ$ 至 -30° 間，共五個風向角。其結果主要分為以下三項做一敘述：

8-3-1-1 顫振臨界風速與扭轉不穩定

由圖8.10之（c）顯示當實場風速接近80m/s時平滑流場下各風向角之扭轉向振動反應極值無明顯增加，而在圖8.11之（c）中所示紊流邊界場方面其風向角對於扭轉向振動反應極值也有相同情況，並無發生顫振扭轉反應突然放大的現象。此時試驗風速已明顯高於本計劃之設計風速（49.4 m/s），因此全橋模型試驗顯示在平滑流場與邊界紊流場均無氣動力不穩定的現象。

8-3-1-2 抖振反應

橋梁的抖振反應係指橋梁在紊流作用的結構動態反應。因此抖振反應是以全橋模型在紊流邊界層流場的量測結果圖8.7、圖8.9、圖8.11、圖8.13、圖8.15為評估依據。

由各圖中均顯示橋面版無論在拖曳向、垂直向與扭轉向的反應在各風向角並無明顯的均方根值反應。在設計風速49.4m/s時，橋面板在垂直向的最大位移反應為0.04公尺、拖曳向的最大位移反應為0.14公尺、扭轉向的最大反應為 0.22° ，橋塔的最大水平向位移反應則為0.07公尺。以上數據顯示本橋梁在設計風速之下的抖振位移反應均可控制在合理的範圍之內。

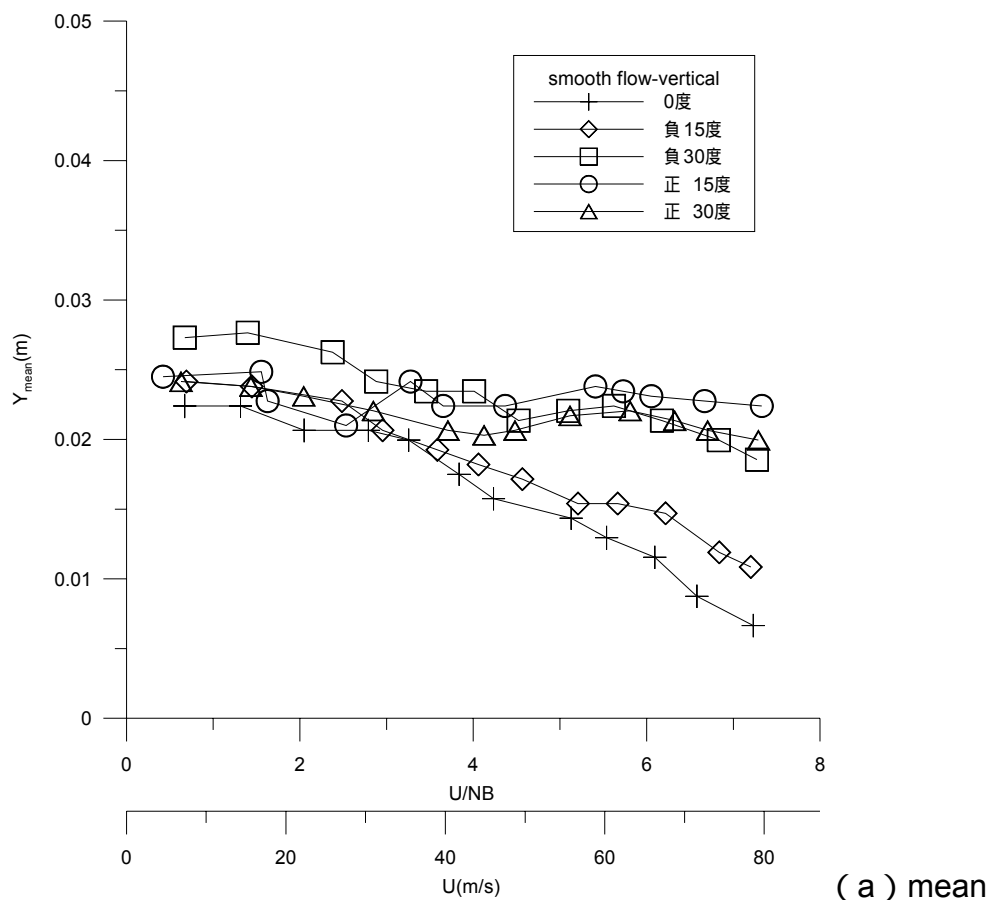
8-3-1-3 渦流顫振

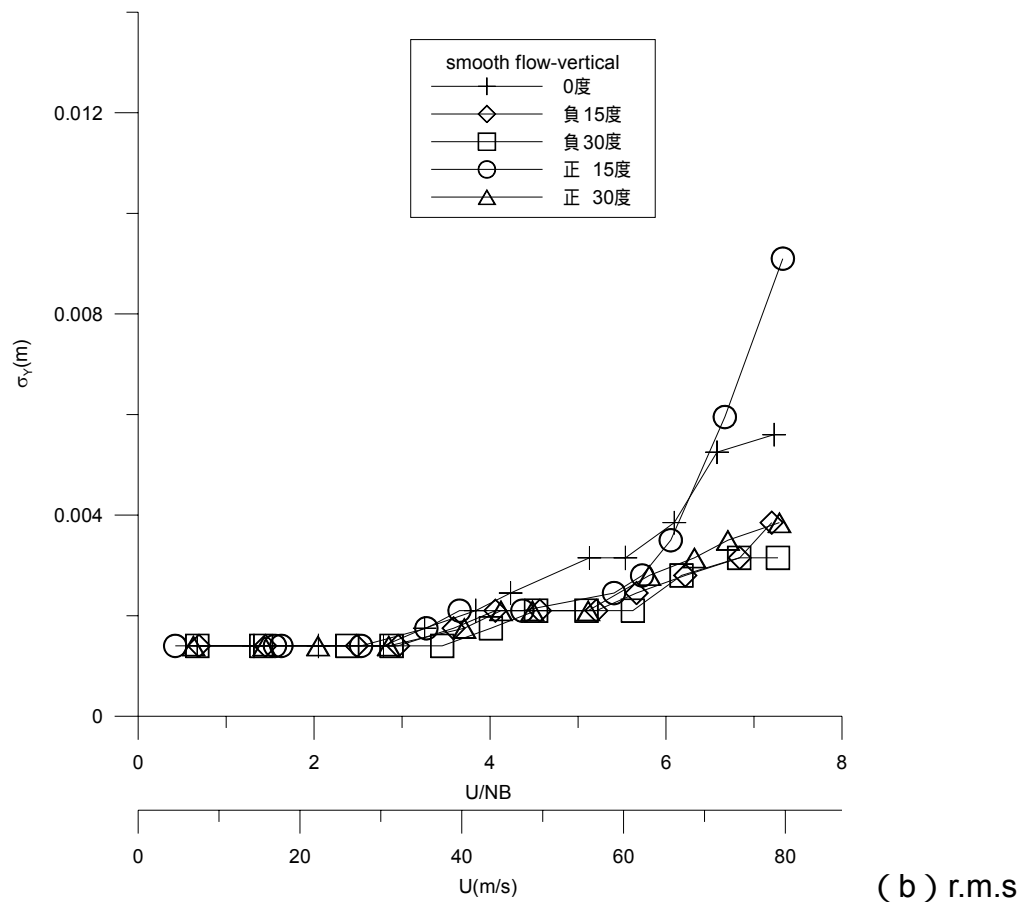
全橋模型試驗中，無論在平滑流場或是紊流邊界層流場均無類似現象發生，代表全橋模型只受到微弱的尾跡渦流影響。

8-4 結論與建議

本研究計畫的內容為漁人碼頭情人橋的空氣動力穩定性評估，經過全橋模型試驗可得下列主要結論：

1. 本研究完成全橋模型試驗，求得平滑流場與邊界層紊流場之橋梁結構反應至實場風速約80m/s為止，超過橋梁設計風速49.4m/s，其氣動力現象均為穩定，顯示本橋梁不會發生空氣不穩定的現象。
- 2.





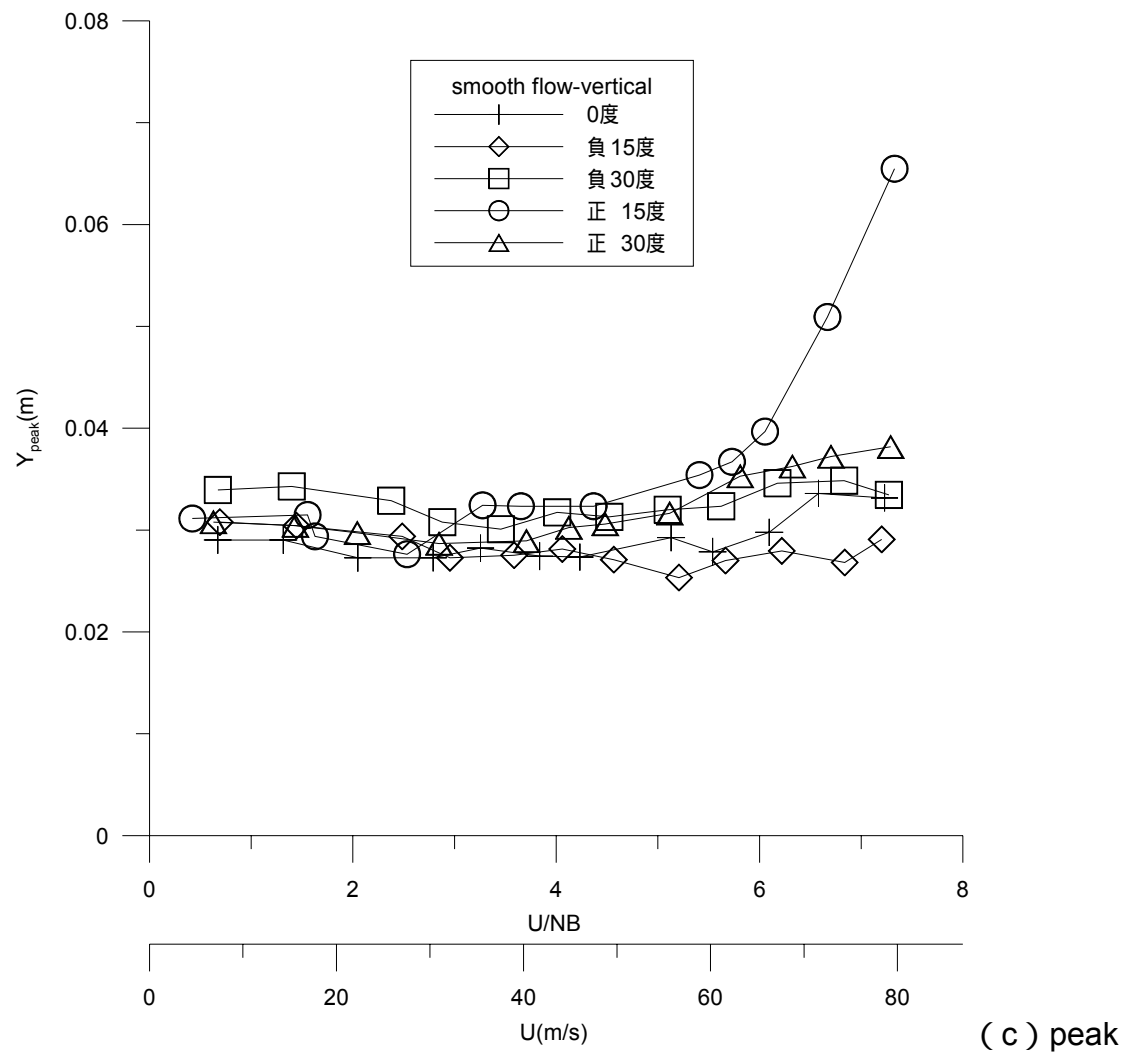
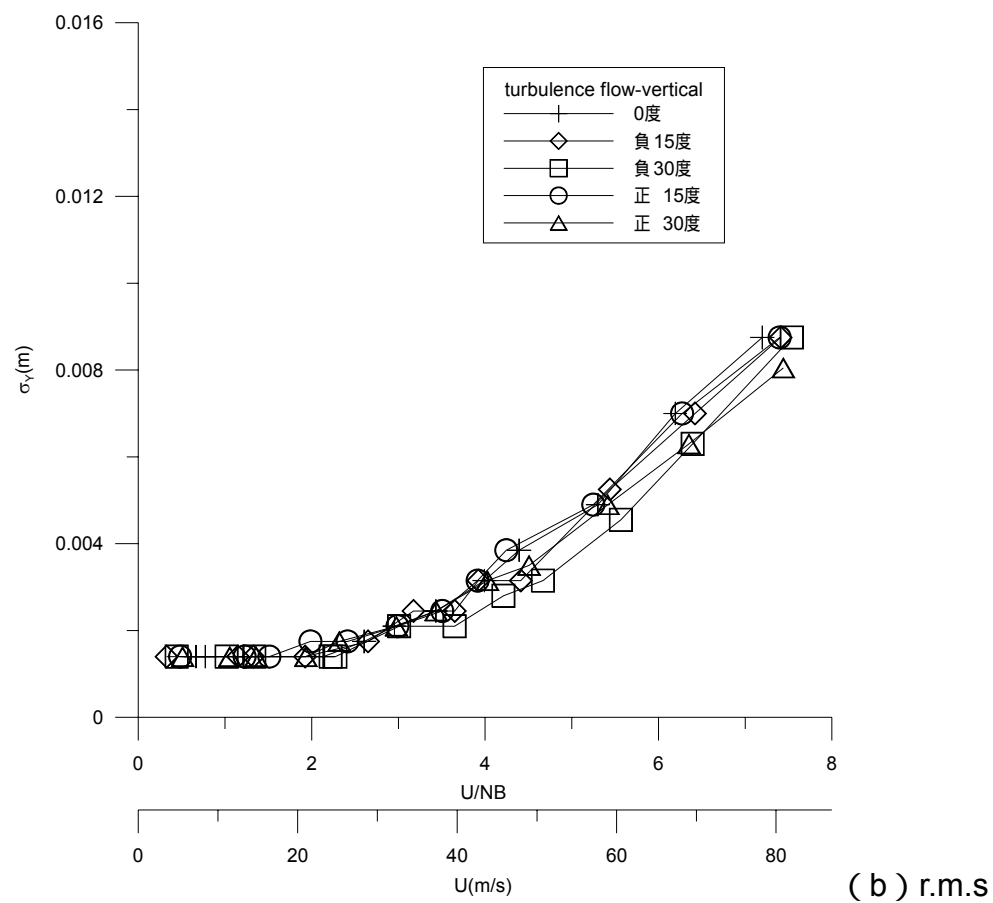
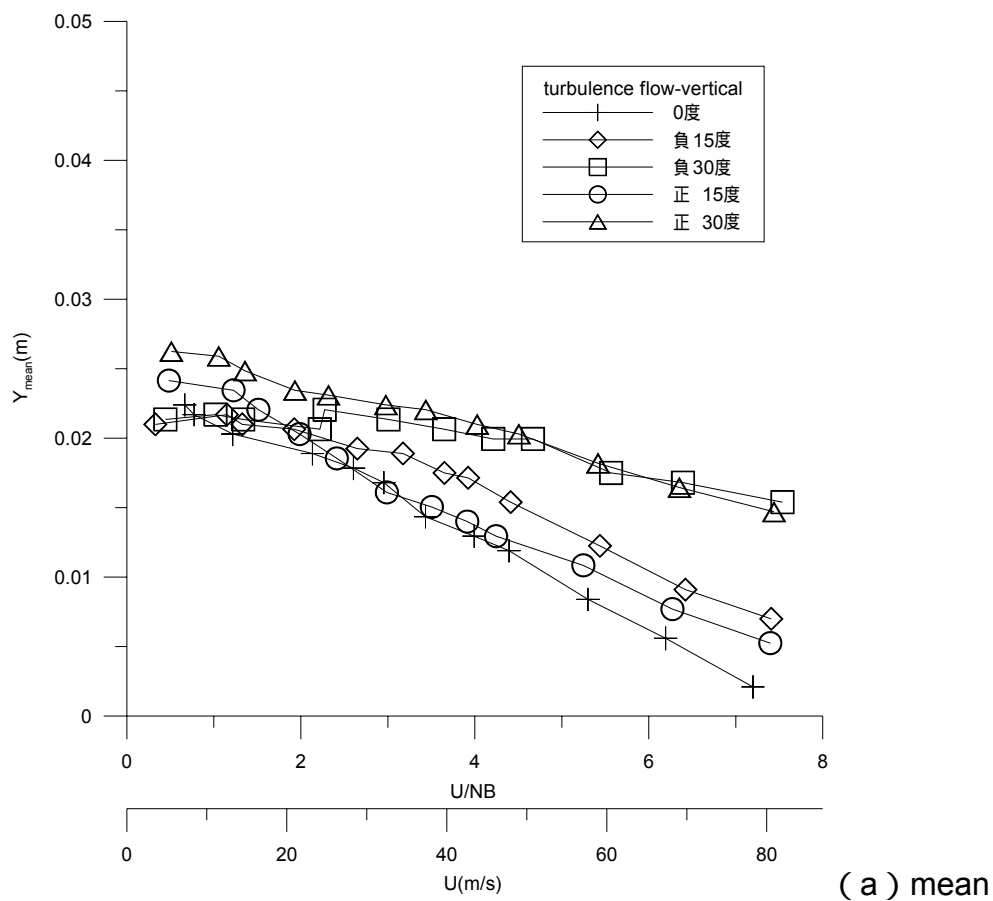


圖 (3-1) 平滑流場下橋面版垂直向(主跨)各風向角之振動反應



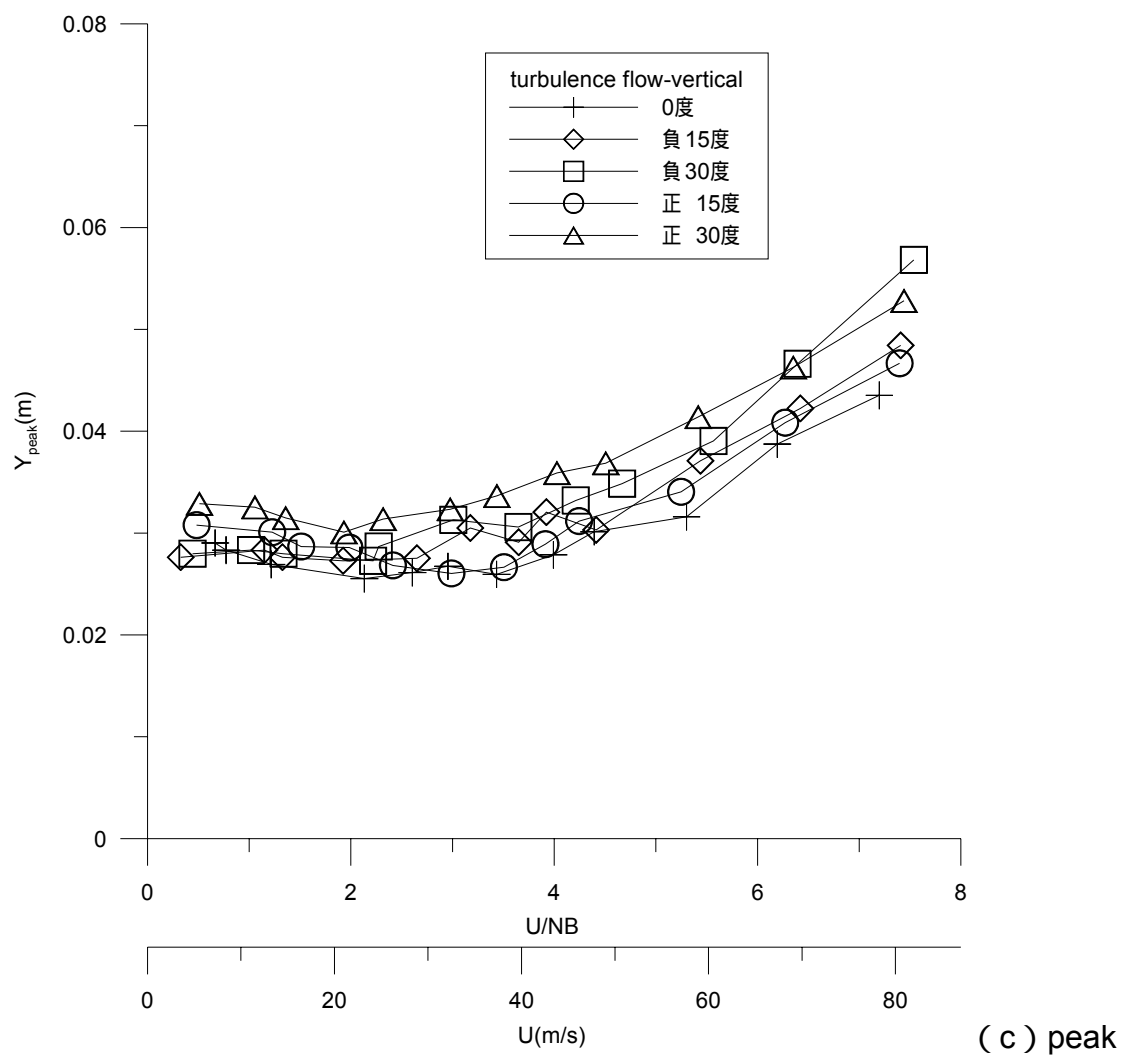
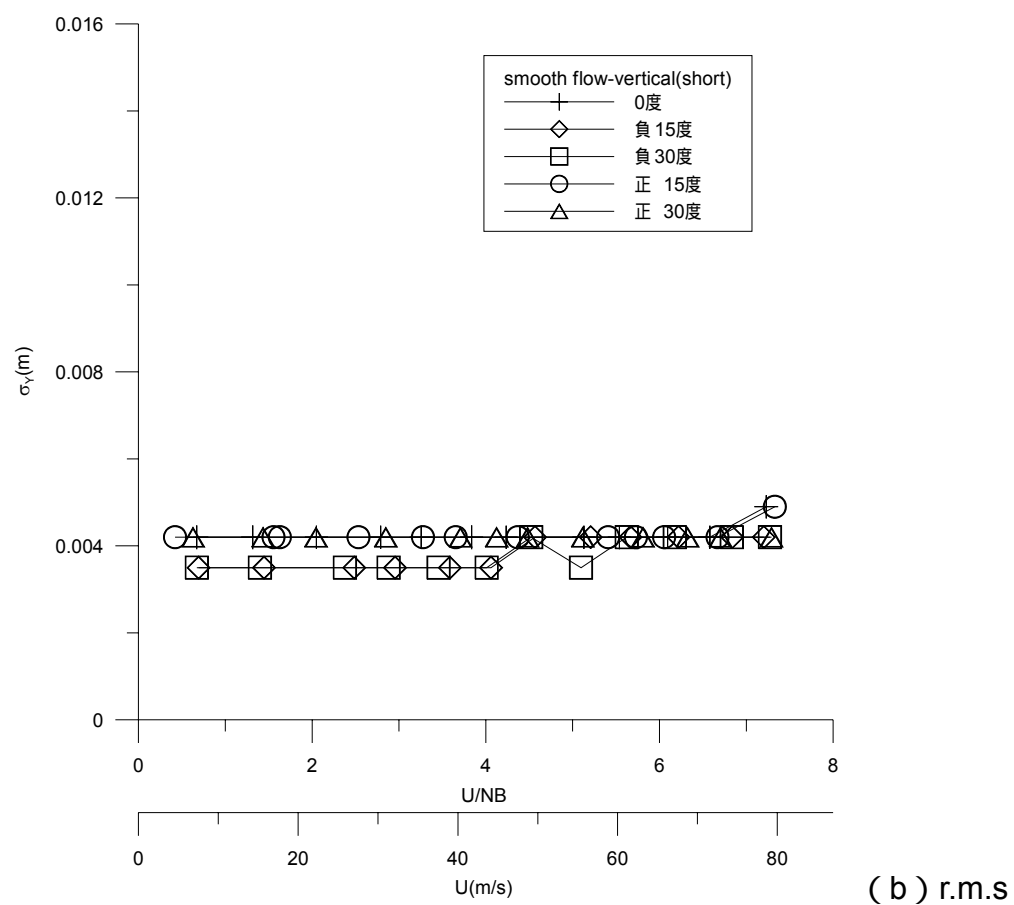
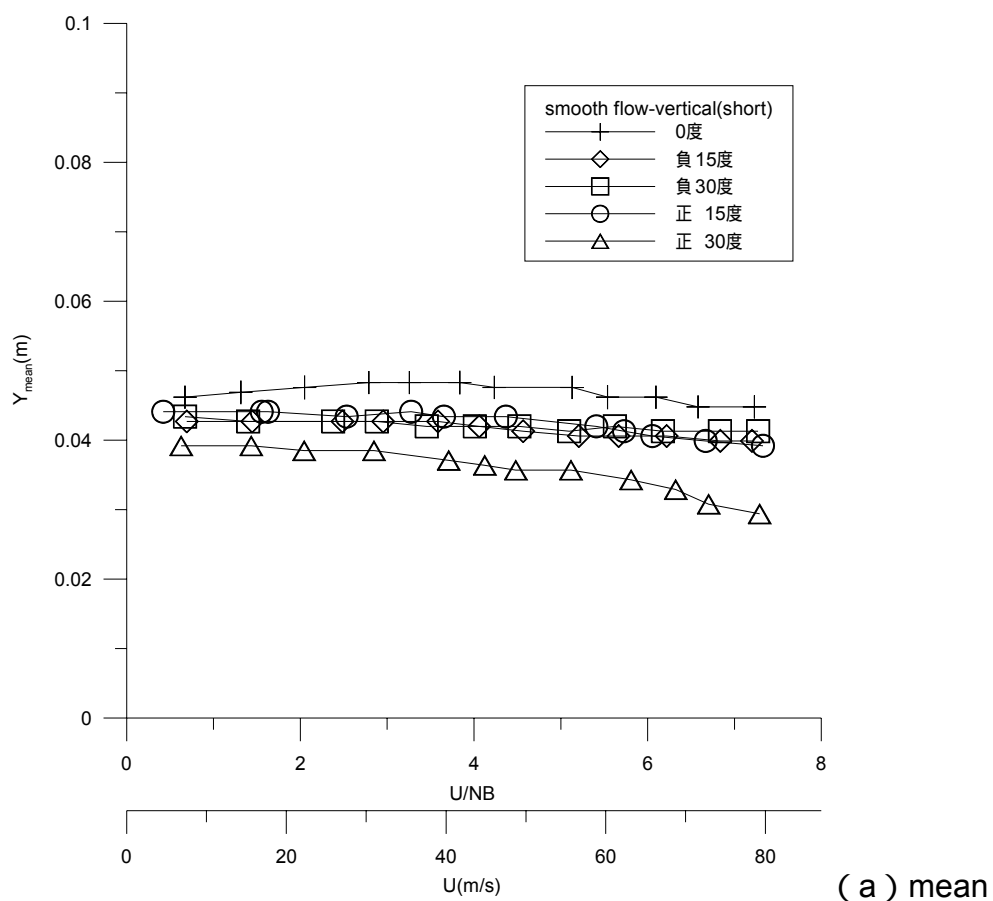


圖 (3-2) 邊界紊流場下橋面版垂直向(主跨)各風向角之振動反應



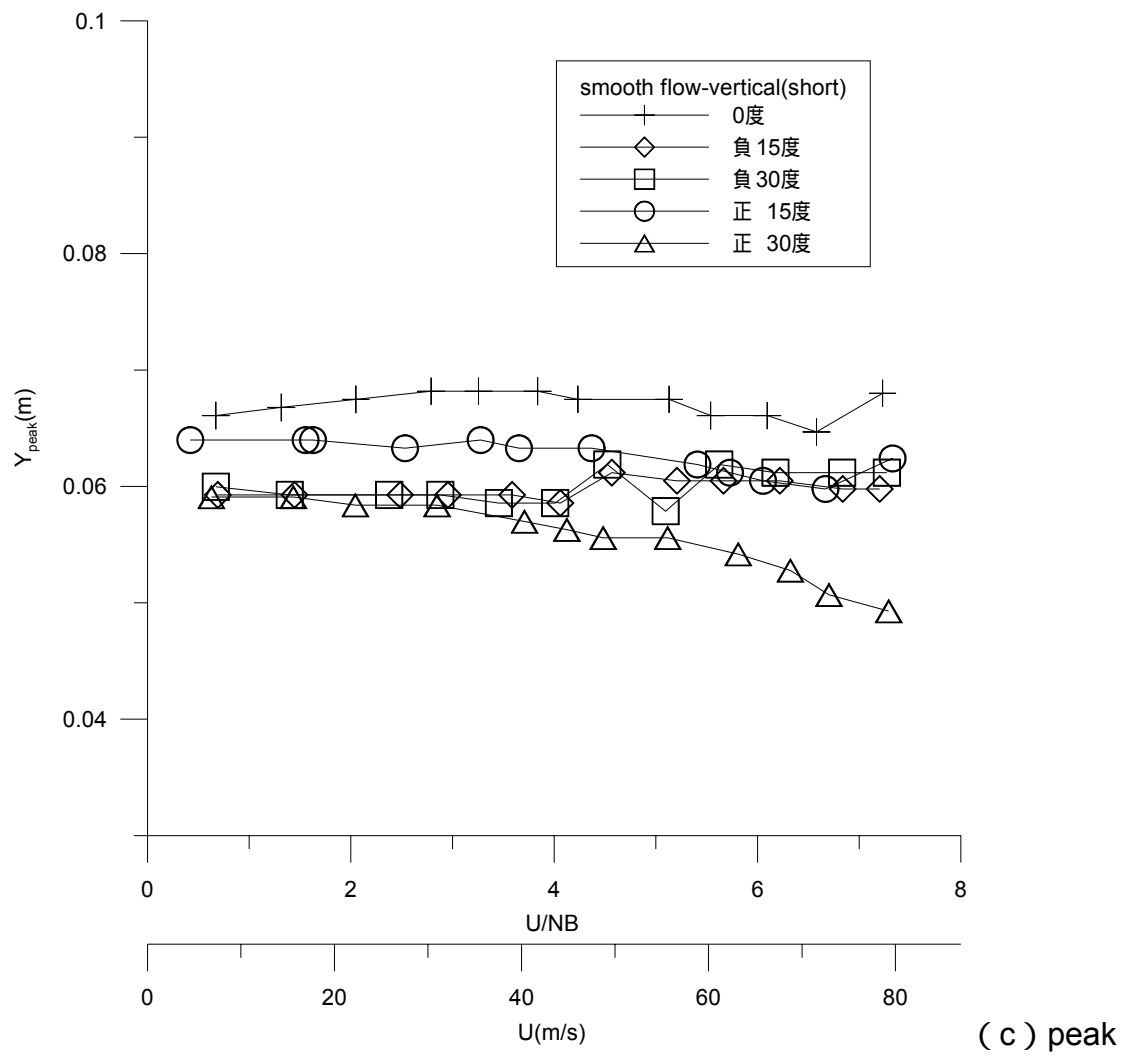
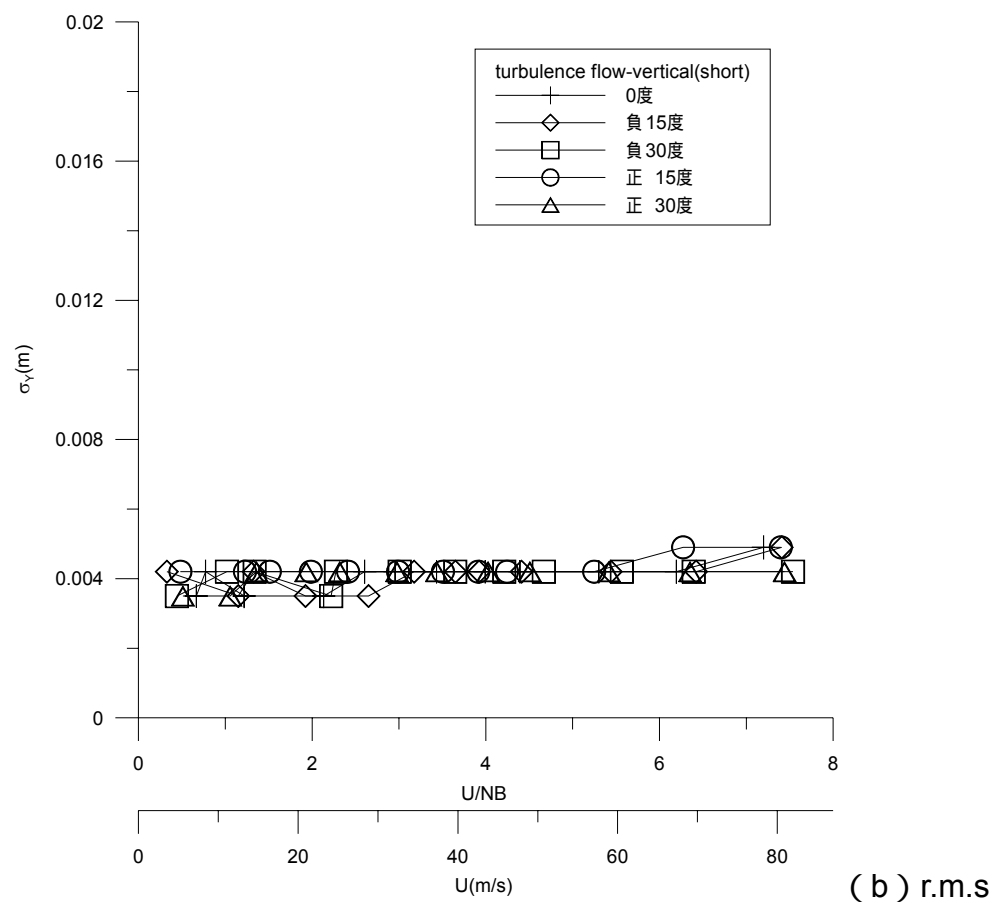
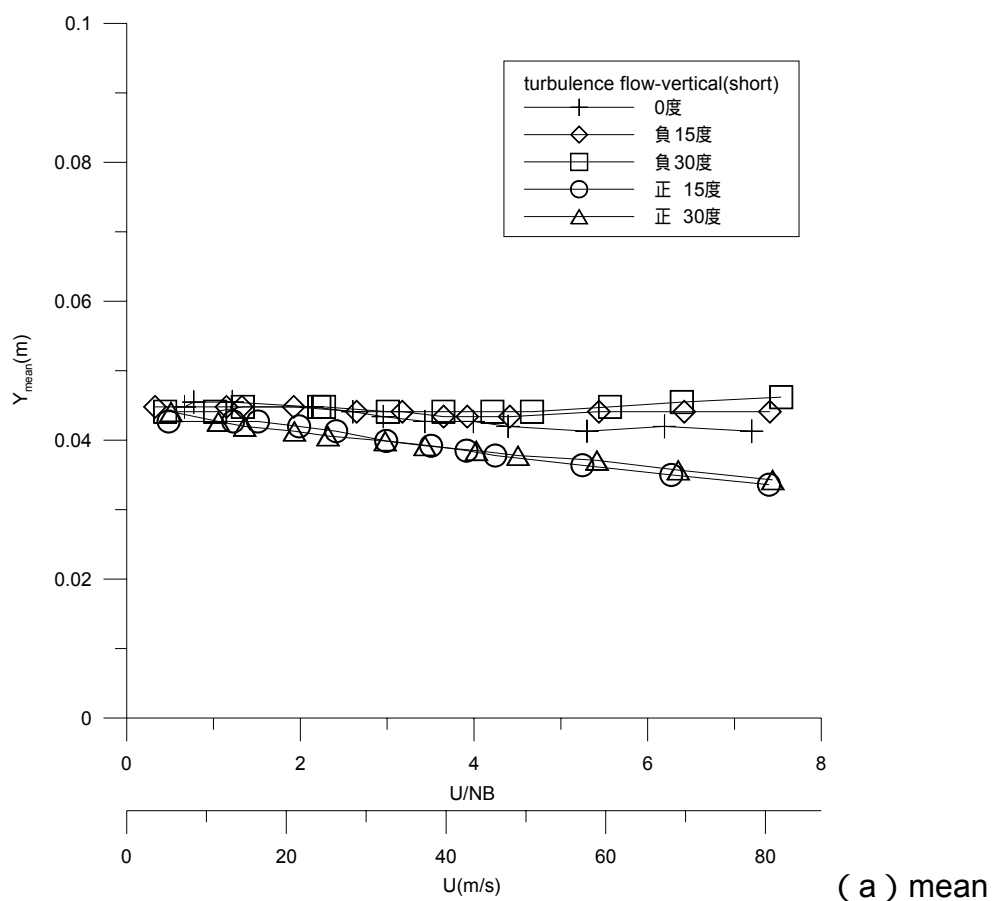


圖 (3-3) 平滑流場下橋面版垂直向(副跨)各風向角之振動反應



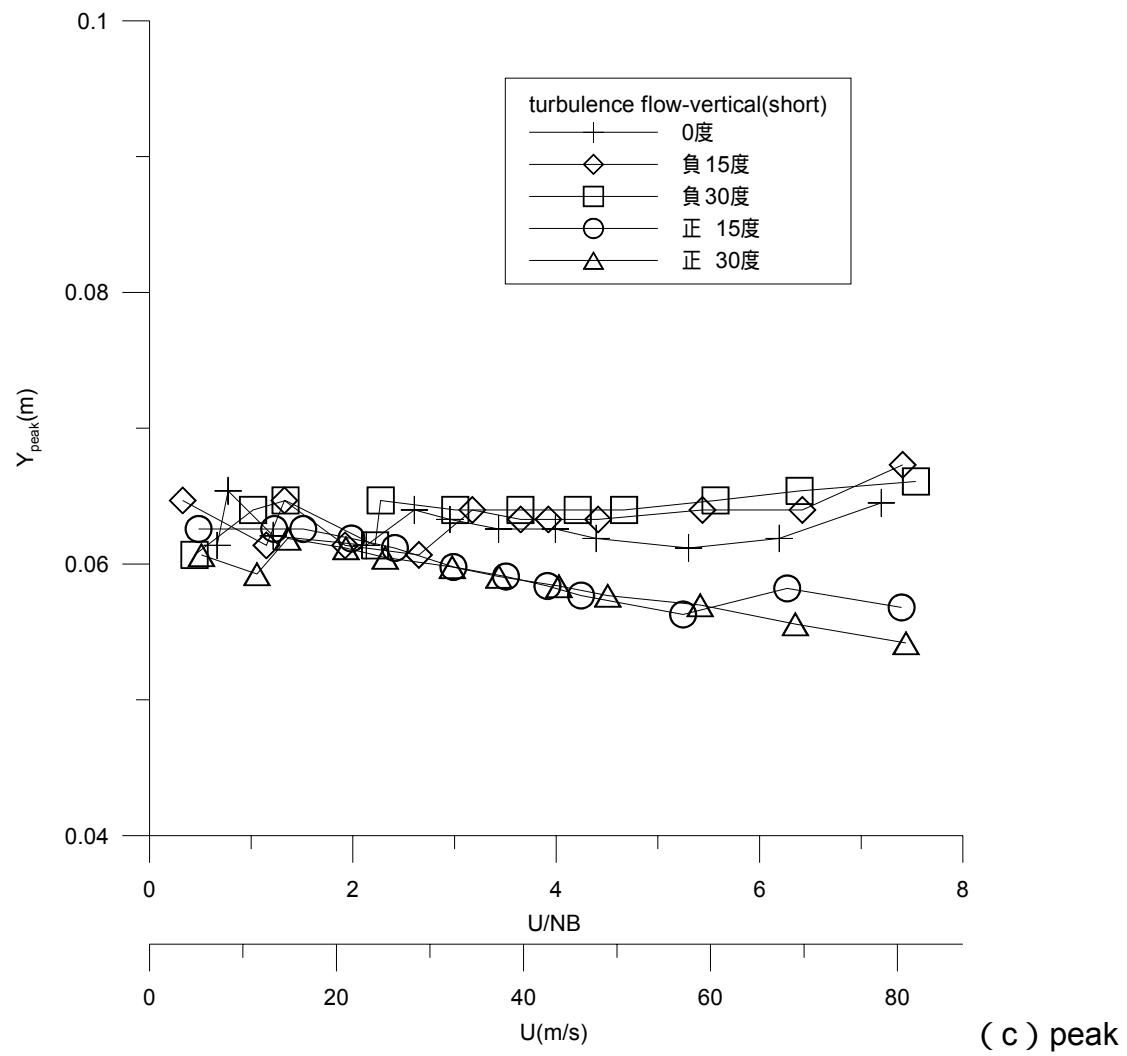
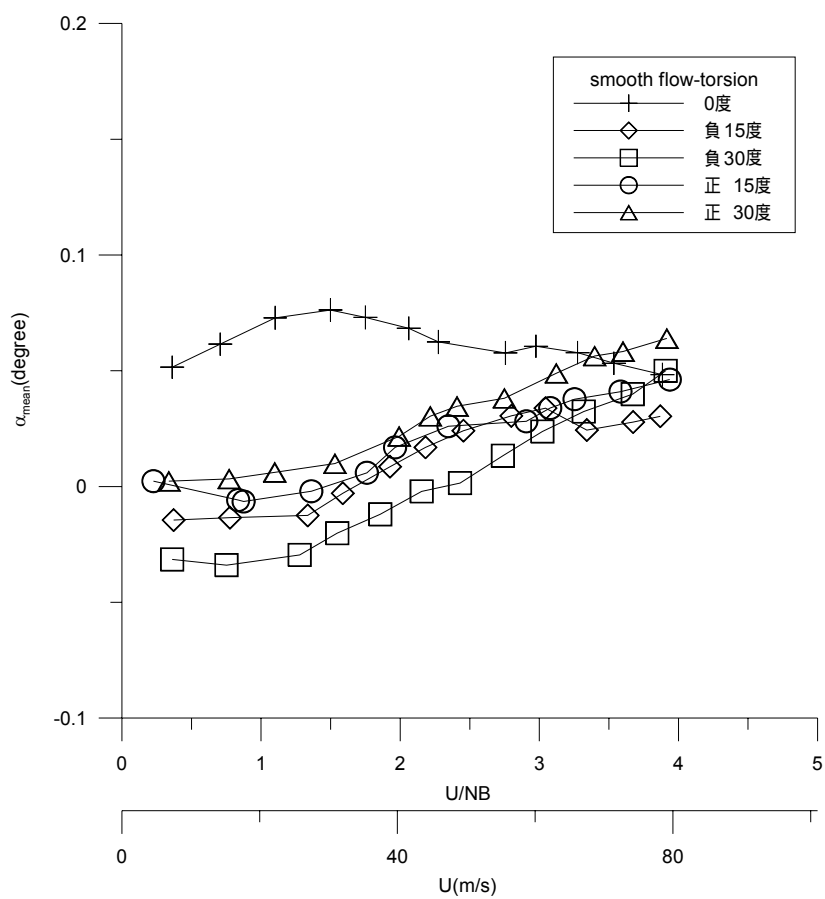
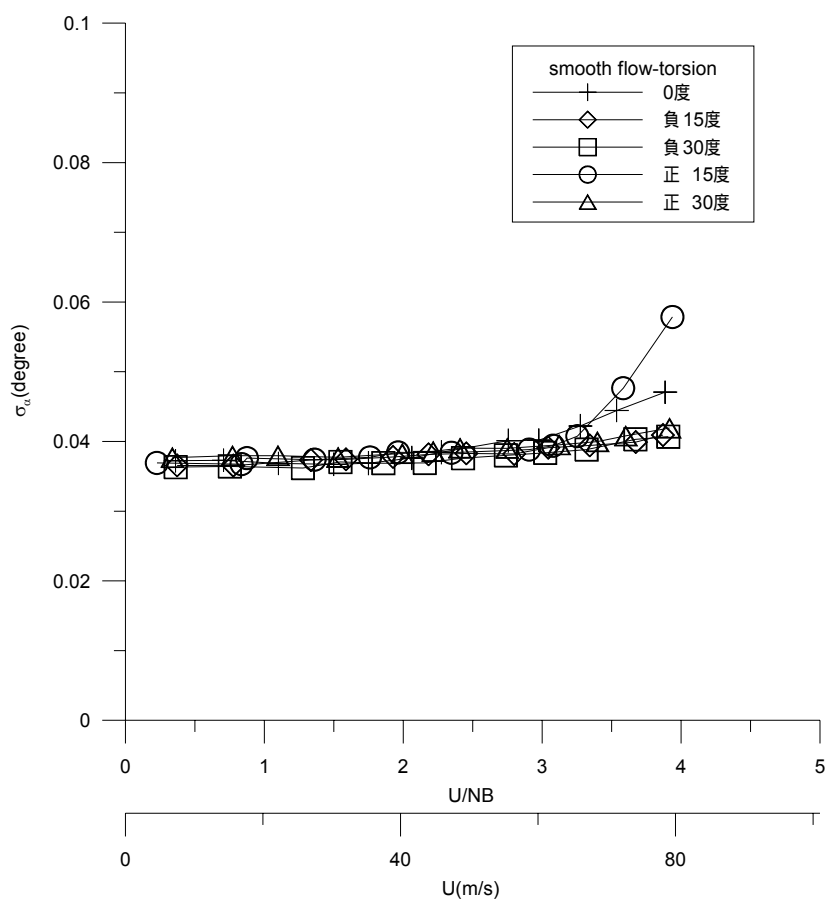


圖 (3-4) 邊界紊流場下橋面版垂直向(副跨)各風向角之振動反應



(a) mean



(b) r.m.s

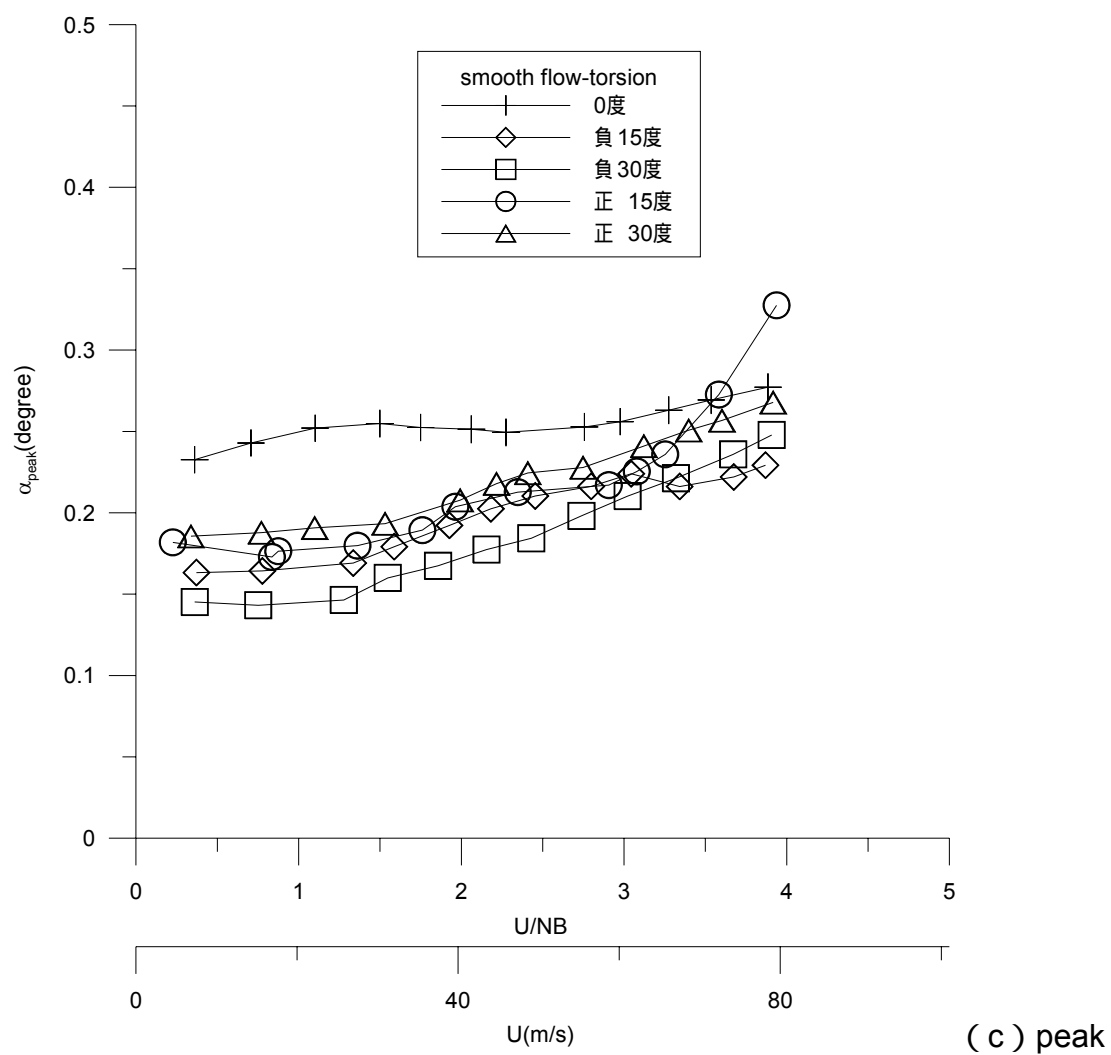
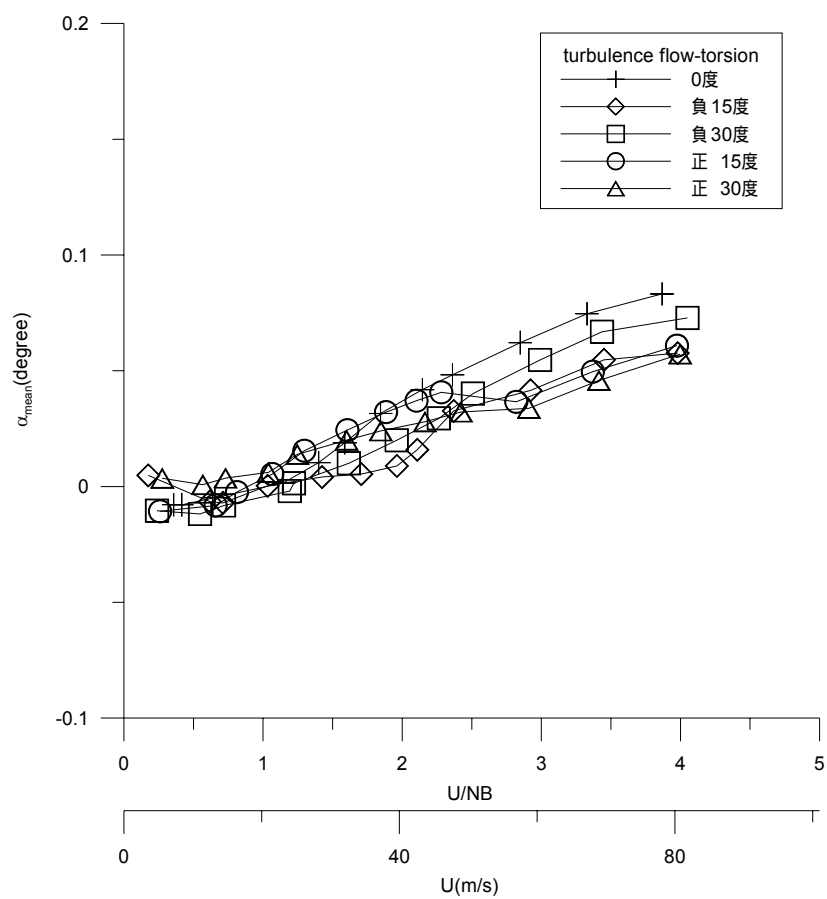
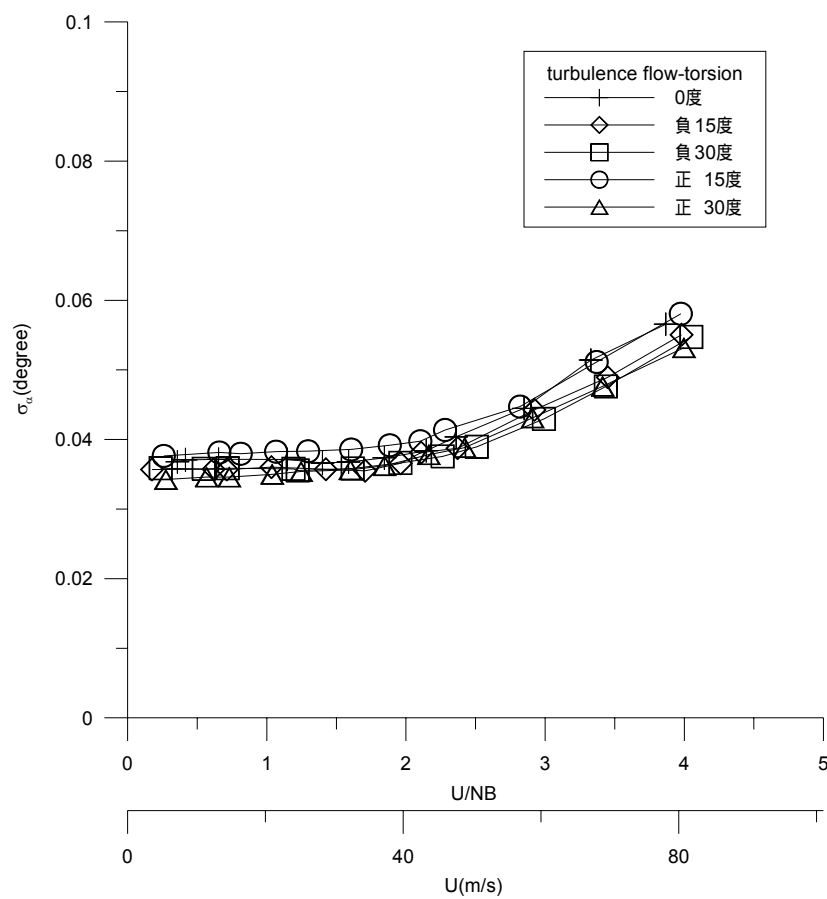


圖 (3-5) 平滑流場下橋面版扭轉向各風向角之振動反應



(a) mean



(b) r.m.s

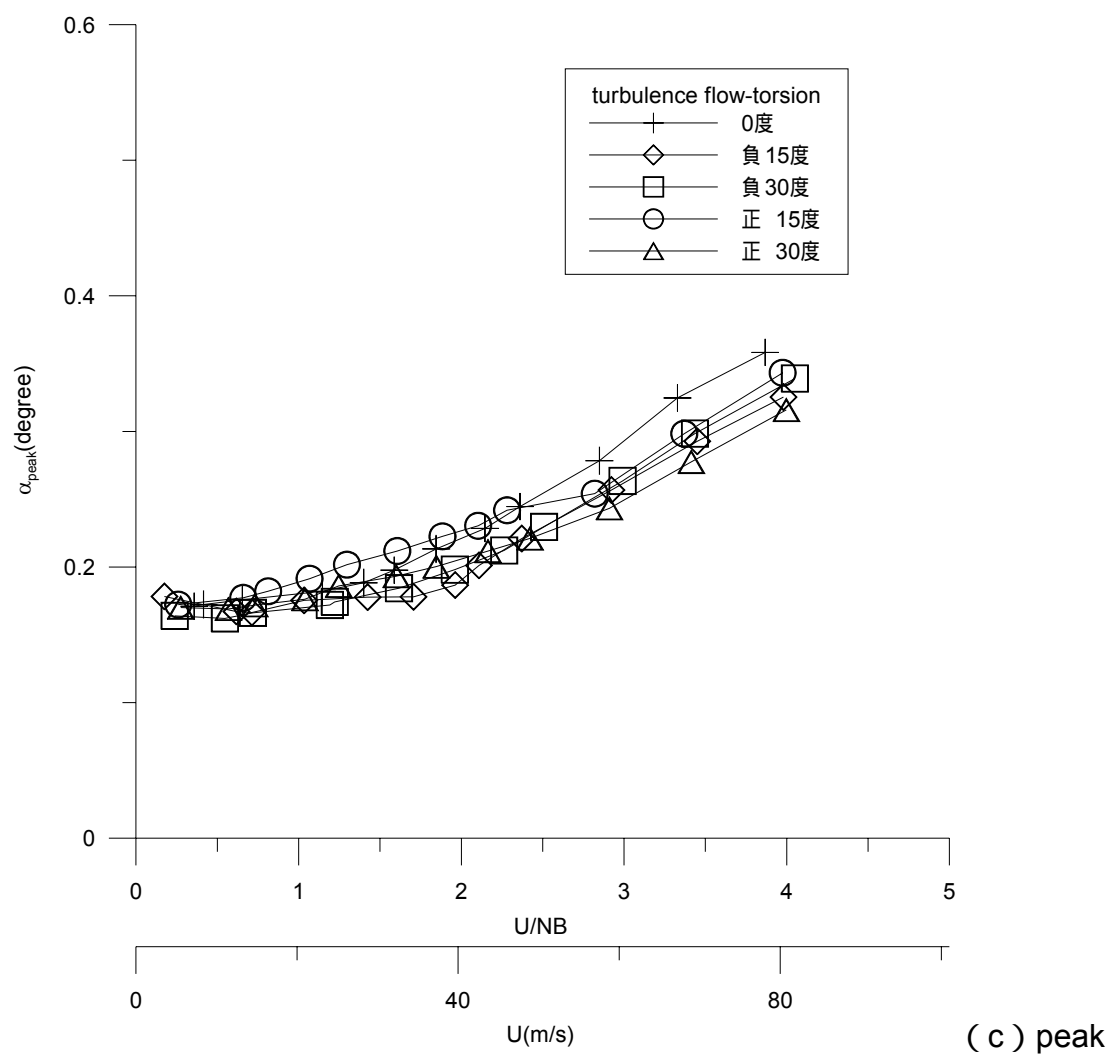
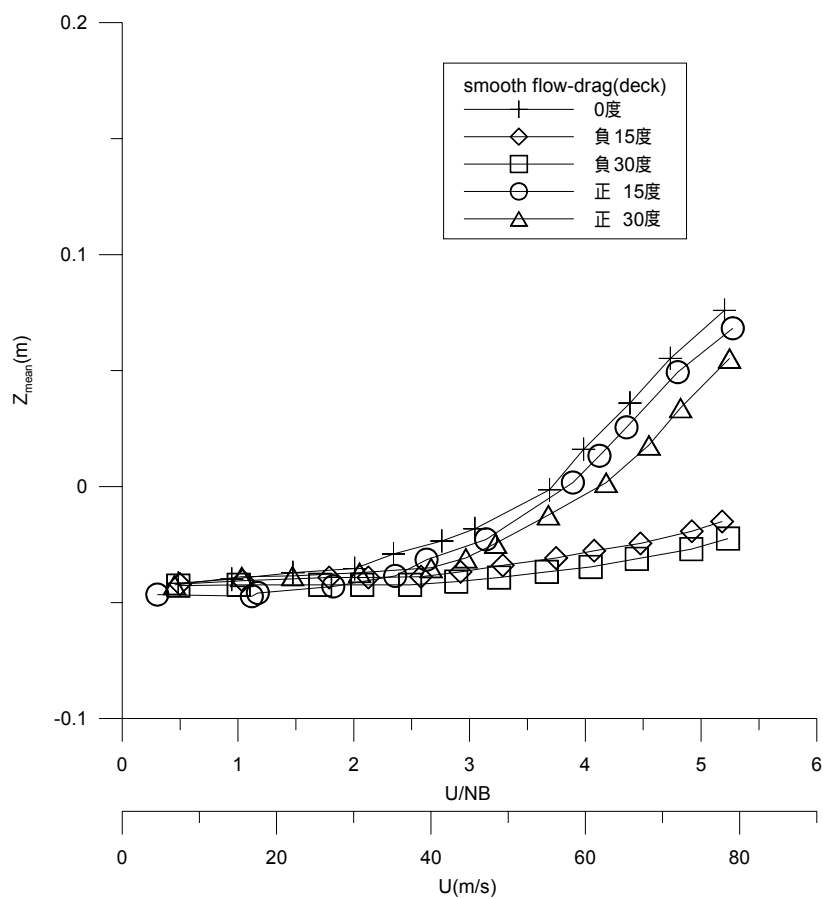
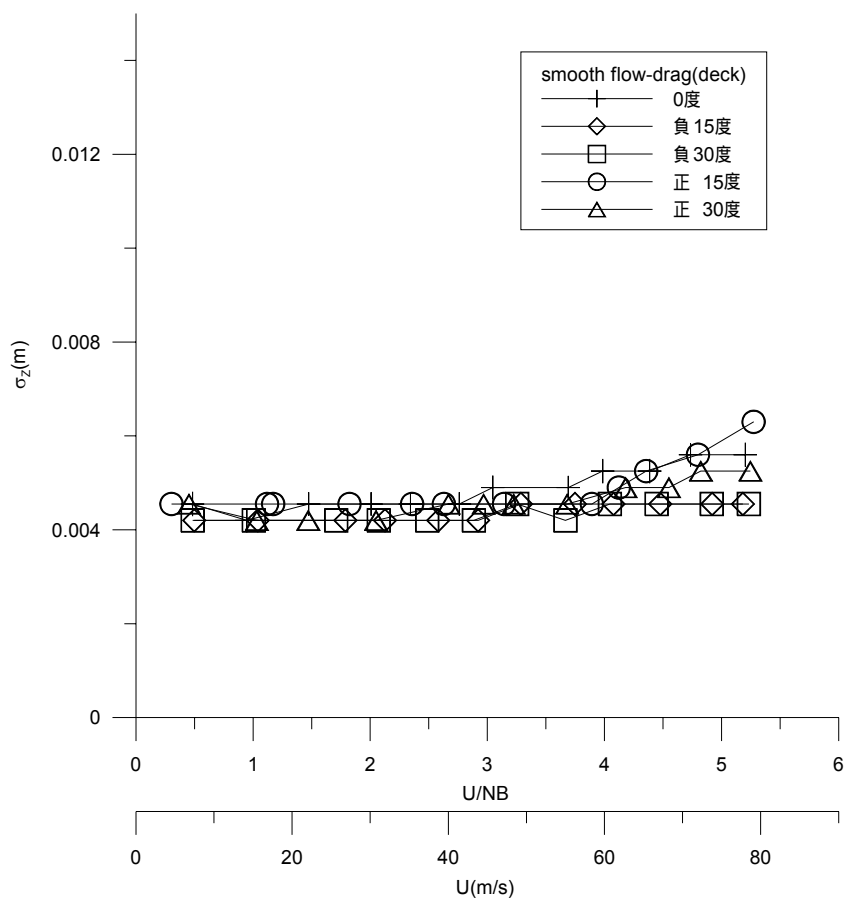


圖 (3-6) 邊界紊流場下橋面版扭轉向各風向角之振動反應



(a) mean



(b) r.m.s

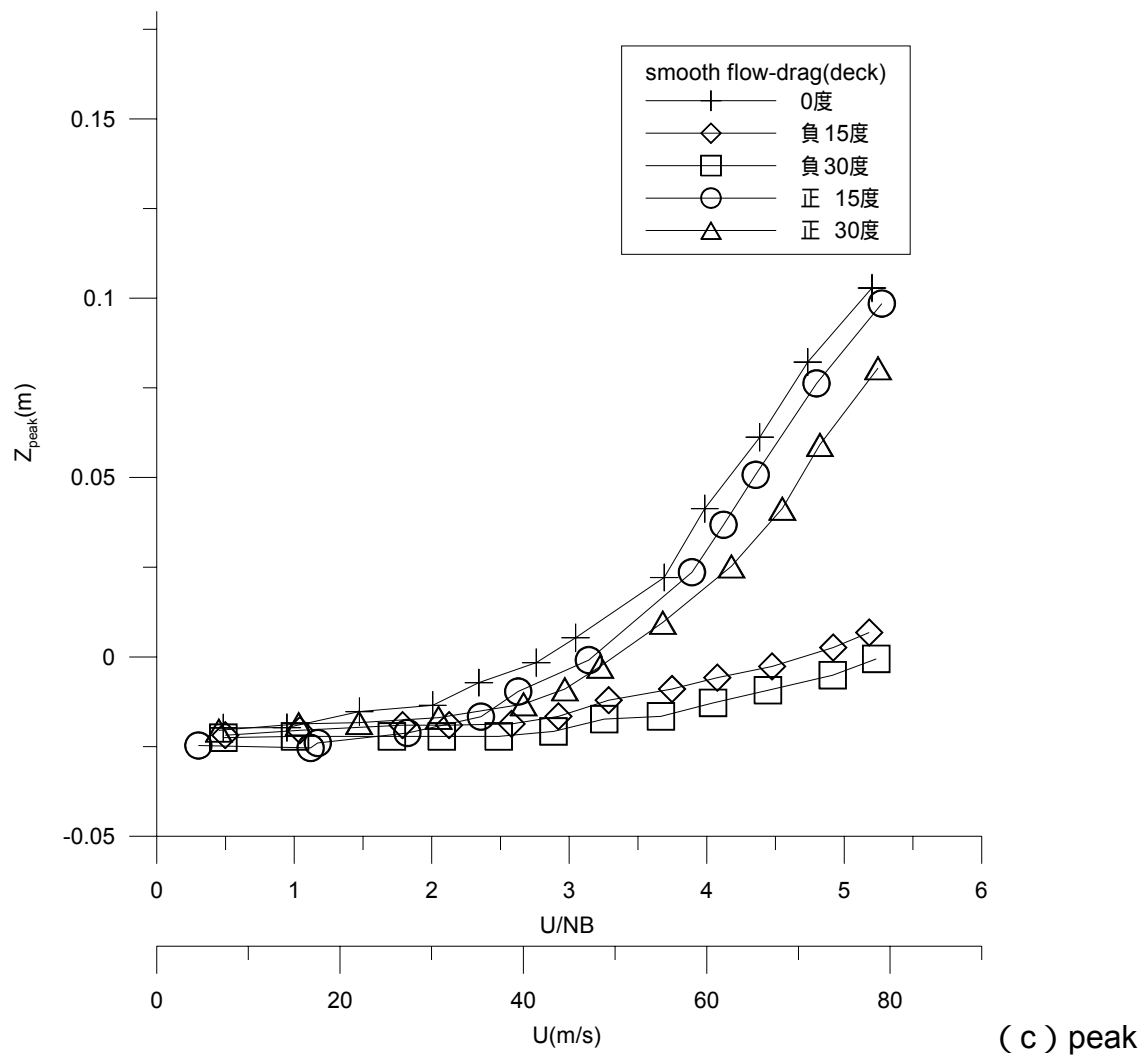
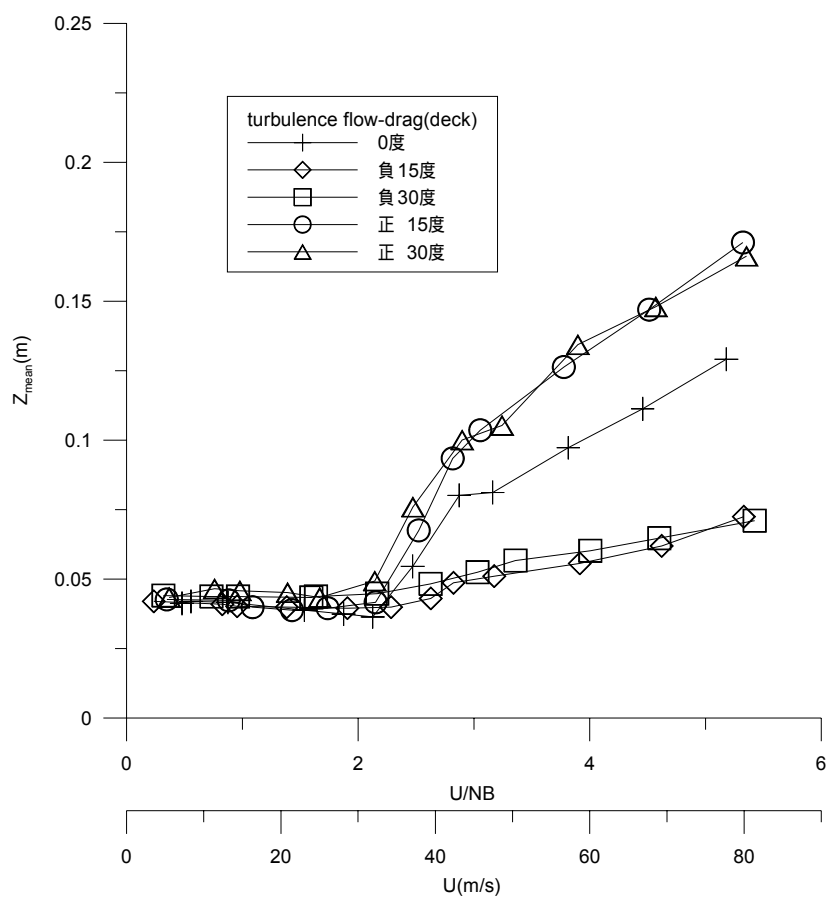
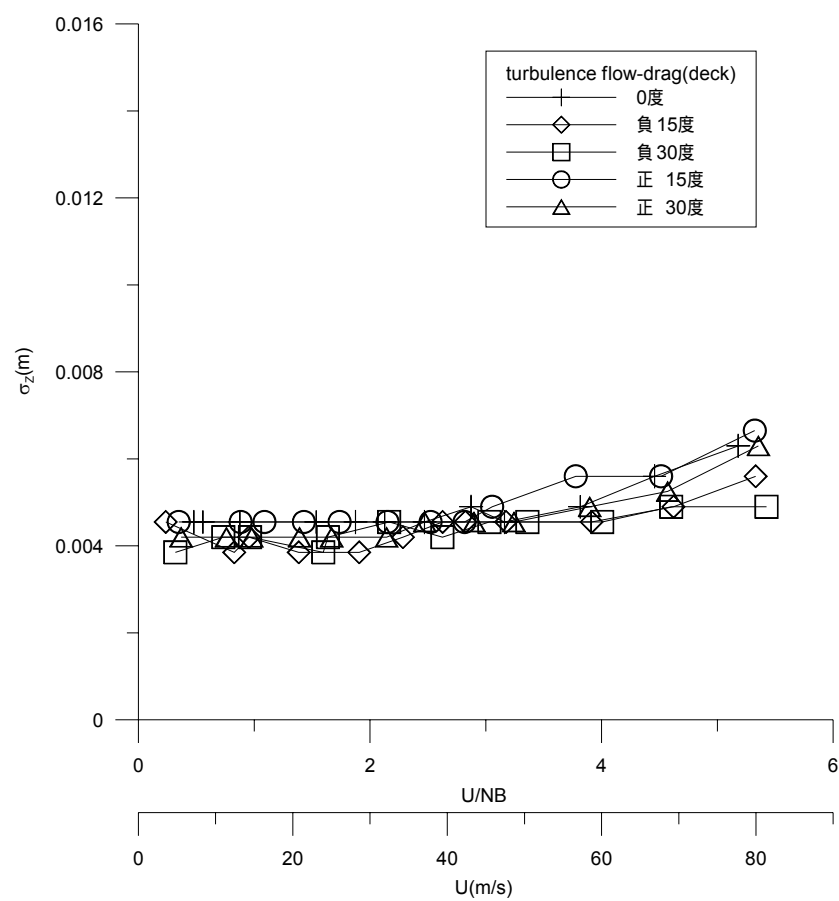


圖 (3-7) 平滑流場下橋面版拖曳向各風向角之振動反應



(a) mean



(b) r.m.s

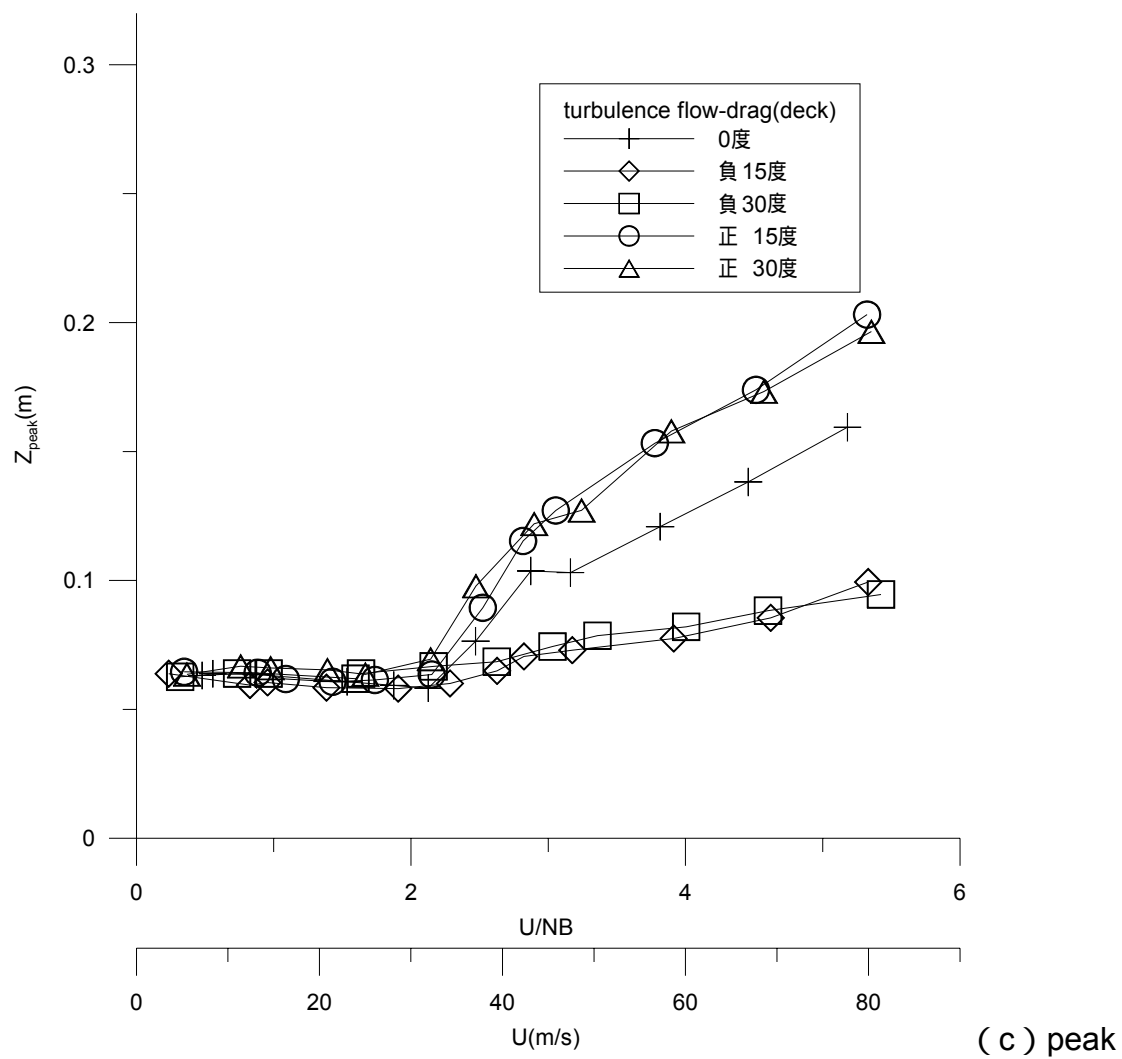
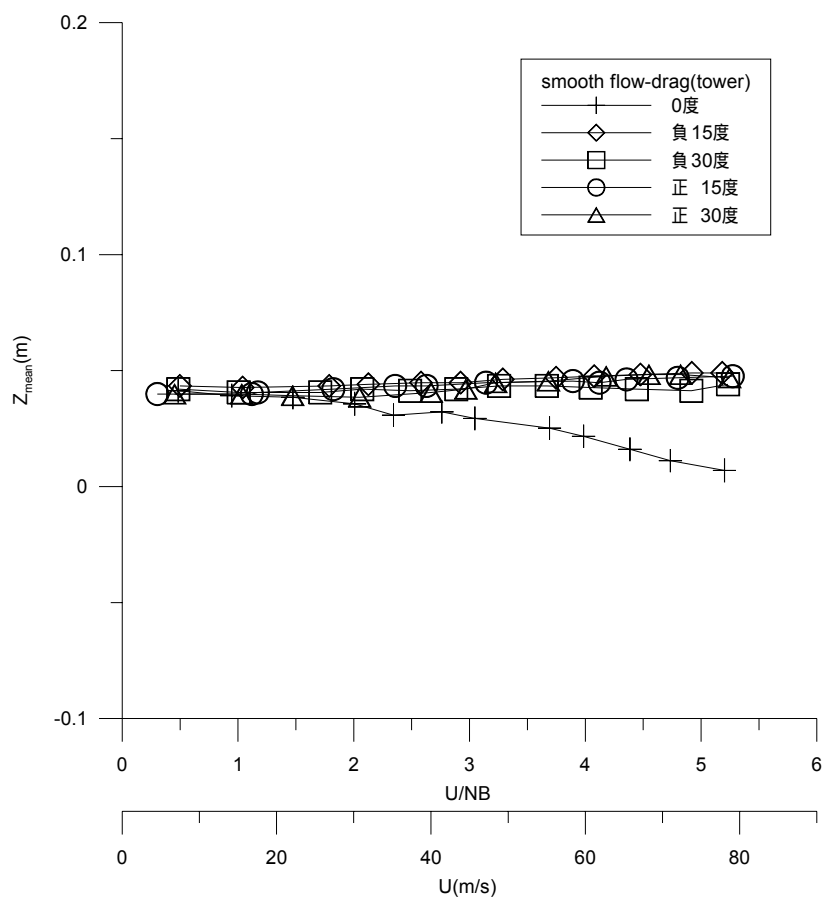
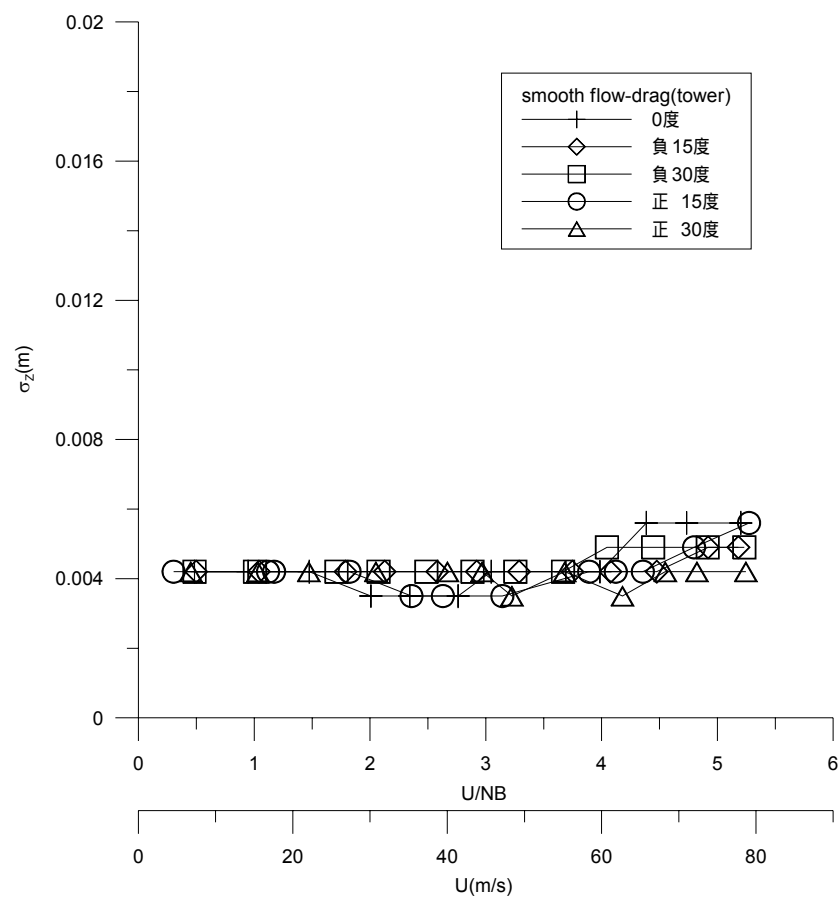


圖 (3-8) 邊界紊流場下橋面版拖曳向各風向角之振動反應



(a) mean



(b) r.m.s

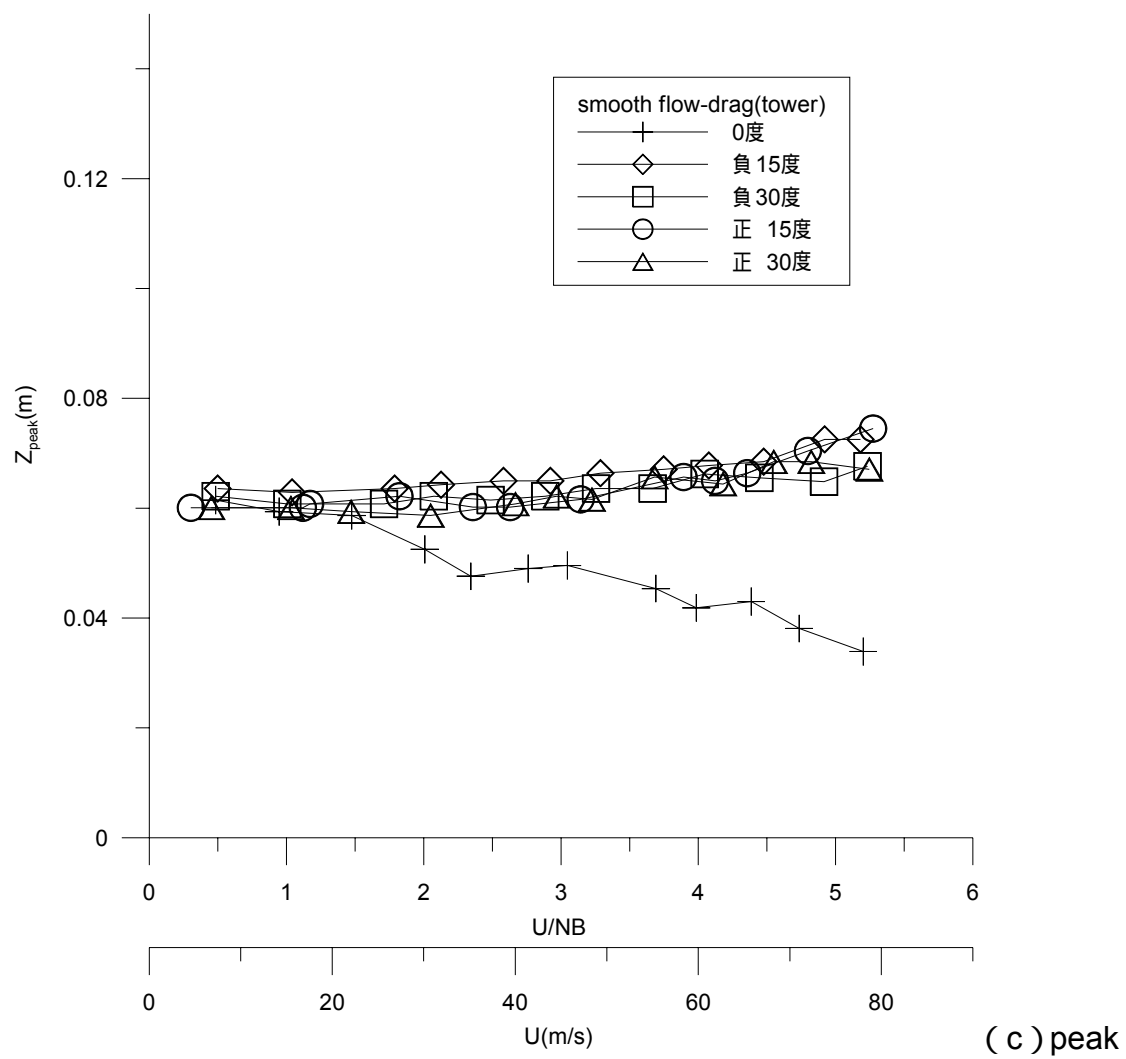
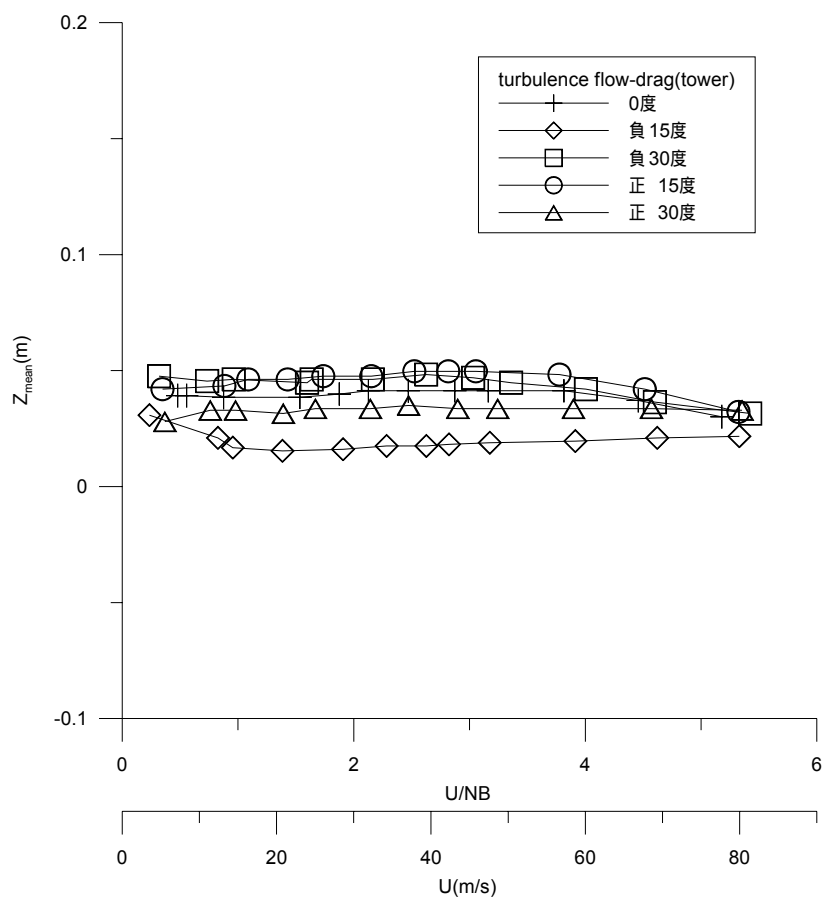
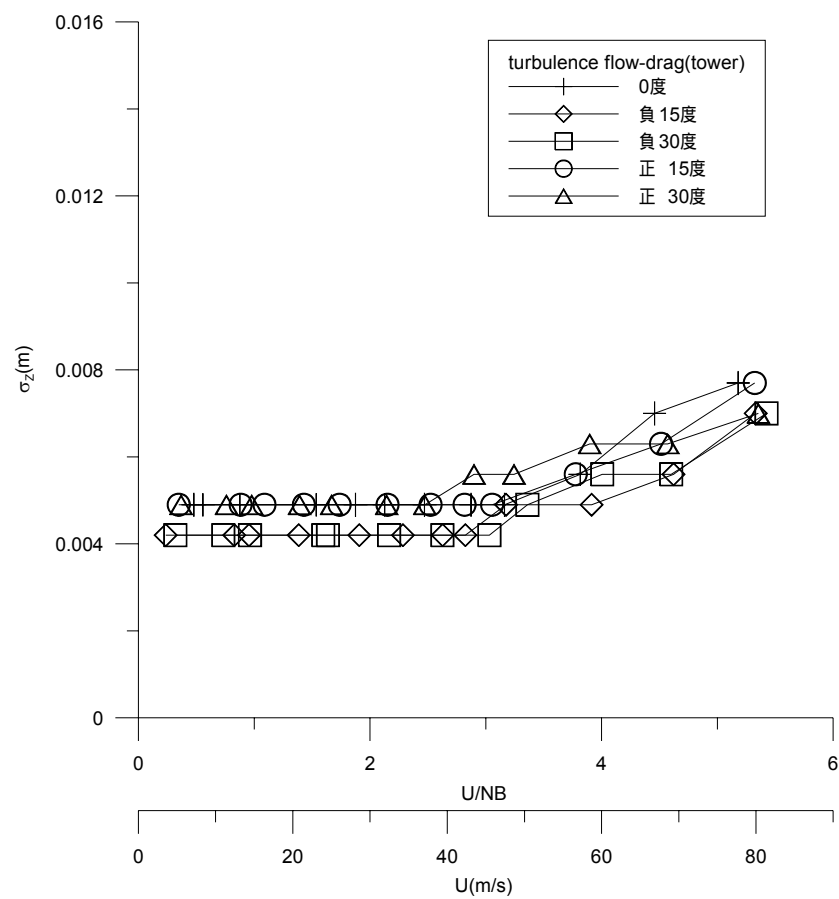


圖 (3-9) 平滑流場下橋塔振動反應均方根值



(a) mean



(b) r.m.s

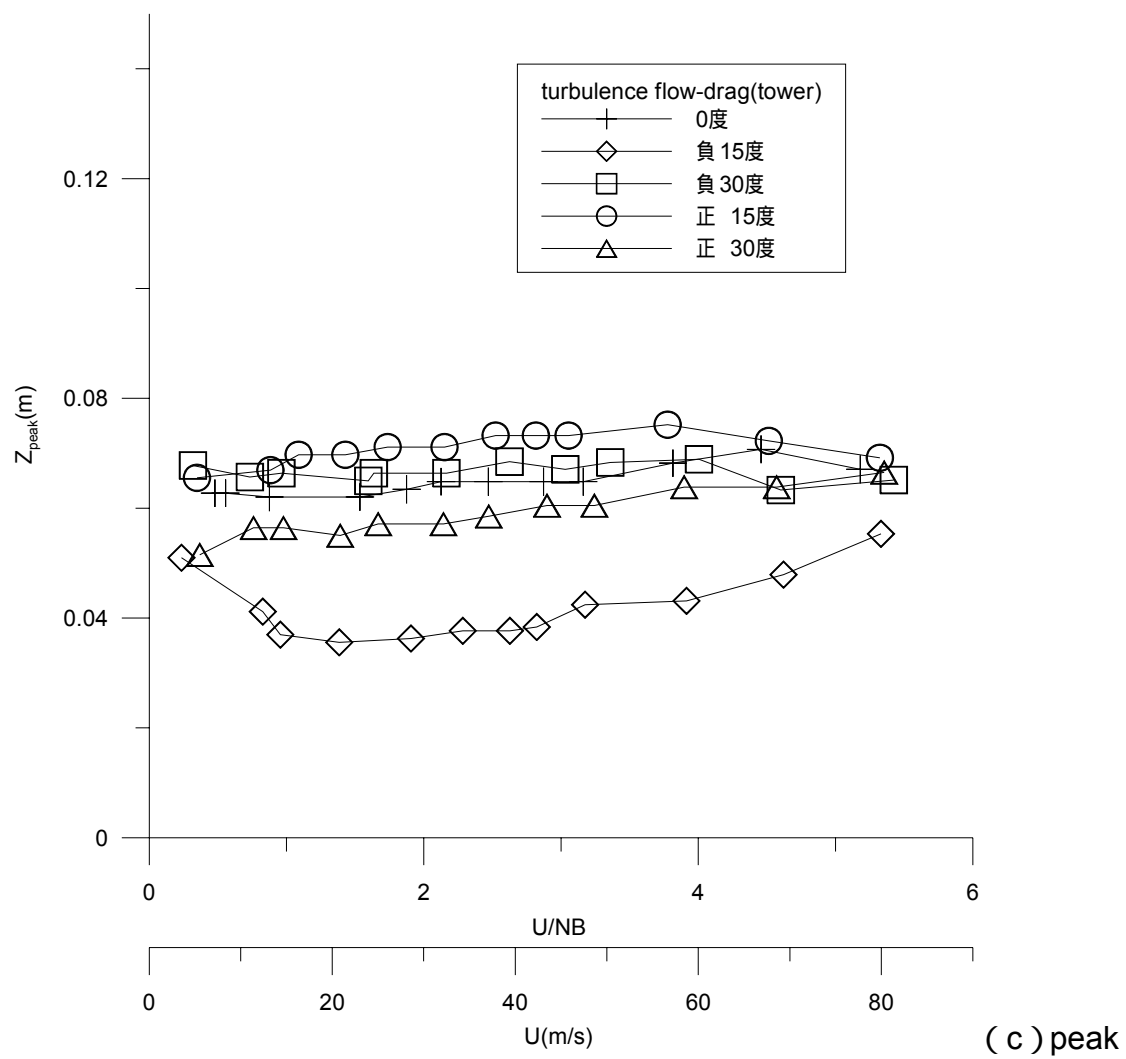


圖 (3-10) 邊界紊流場下橋塔振動反應均方根值